

Федеральное государственное бюджетное учреждение  
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

**СБОРНИК  
НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫХ СТАТЕЙ –  
ПОБЕДИТЕЛЕЙ КОНКУРСА РФФИ  
2013 ГОДА**

**Выпуск 17**

Под редакцией члена-корреспондента РАН  
В.А. Шахнова

Москва  
Молнет  
2014

**Сборник научно-популярных статей-победителей конкурса РФФИ 2013 года.**  
Выпуск 15 / Под редакцией члена-корреспондента РАН В.А. Шахнова. –  
М.: «МОЛНЕТ», 2012. – 456 с.

**Collection of best popular articles written for the contest, organized by the Russian  
Foundation for Basic Research.** Volume 15 / Editor V.A. Shahnov – MOLNET Publishing,  
2012. – 456 p.

Авторы книги – победители конкурса научно-популярных статей 2013 года, организо-  
ванного Российским фондом фундаментальных исследований.

Представлены следующие разделы наук: математика, информатика, механика, физика и  
астрономия, химия и науки о материалах, биология и медицинская наука, науки о Земле,  
науки о человеке и обществе, инфокоммуникационные технологии и вычислительные  
системы, фундаментальные основы инженерных наук. Ученые, выполняющие проекты  
Российского фонда фундаментальных исследований, рассказывают о своих работах.

Издание адресовано научным работникам, студентам и аспирантам, руководству  
научно-исследовательских институтов.

ISBN 978-5-9903422-5-5



*Издание осуществлено при поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований*

© Коллектив авторов, 2014  
© РФФИ, 2014  
© «МОЛНЕТ», 2014

**Содержание****МАТЕМАТИКА,  
ИНФОРМАТИКА,  
МЕХАНИКА***В.П. Ильин*Ухабы на дорожной карте  
математического моделирования*И.Н. Бородин*Ухабы на дорожной карте  
математического моделирования**ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ***А.И. Волокитин*

Силы Казимира между наноструктурами.

*О.В. Верходанов*Научно-популярная статья «Реликтовое  
излучение: читаем код Вселенной»*В.В. Больгинов*Джозефсоновские переходы с  
ферромагнитным барьером для  
сверхпроводниковой электроники*А.С. Шалин, С. В. Сухов*

Лучи притяжения

**ХИМИЯ И НАУКИ  
О МАТЕРИАЛАХ***Р. Б. Моргунов, О.В. Коплак*Как триплетный кислород пишет  
спинами штрих-код*Н.В. Зык, Е.К. Белоглазкина,**О.Б. Бондаренко, Р.Л. Антипин*Реагент + катализатор =  
активирующий сореагент*В.В. Еремин, А.С. Белов, И.О. Глебов,**В.В. Поддубный*Когерентные и диссипативные пути  
фотосинтеза**Contents****MATHEMATICS,  
INFORMATICS,  
MECHANICS**8 *V.P. Ilyin*The gops of roadmap  
of mathematical modeling16 *I.N. Borodin*

Multiscale modeling of plasticity

**PHYSICS & ASTRONOMY**28 *A.I. Volokuitin*

Casimir forces between nanostructures

37 *O.V. Verhodanov*Popular science article "Cosmic microwave  
background - read the code of the Universe"51 *V.V. Bolginov*Ferromagnetic based Josephson junctions  
for digital digital and quantum electronics67 *A.S. Shalin, S.V. Suhov*

Tractor beams

**CHEMISTRY  
AND MATERIAL SCIENCES**76 *R.B. Morgunov, O.V. Koprak*

How triplet oxygen draws spin-key-gen

85 *N.V. Zyk, E.K. Beloglazkina,**O.B. Bondarenko, R.L. Antipin*

Reagent + catalyst = activating coreagent

95 *V.V. Eremin, A.S. Belov, I.O. Glebov,**V.V. Poddubnyi*Coherent and dissipative paths of  
photosynthesis

## БИОЛОГИЯ И МЕДИЦИНСКИЕ НАУКИ

*М.В. Ремизова*  
Считаем до двух: число семядолей у гидател-  
ловых – необычных родственников кувшинок

*И.А. Тарчевский, В.Г. Яковлева,  
А.М. Егорова., Н.В. Петрова*  
Как салициловая кислота помогает  
растениям создавать иммунитет против  
болезнетворных микроорганизмов

*А.А. Махров, И.Н. Болотов, В.С. Артамонова*  
Европейская жемчужница - вид,  
которому трудно приспосабливаться

*И.А. Володин, Е.В. Володина*  
Много оленей, хороших... но разных!

*Н.Е. Завьялова*  
Оболочки пыльцевых зерен. Что они говорят  
о вымерших предках современных растений

*А.В. Поляков, П.В. Бородин*  
Обыкновенная бурозубка и ее  
внутривидовые гибриды

*Л.В. Козлова*  
Как растянуть железобетон?

*М.А. Кулакова*  
О талантах к регенерации, червях,  
умеющих считать и судьбоносных генах

*И.Б. Алиева, Р.Э. Узбеков*  
Реснички и жгутики – геометрическое  
совершенство, определяющее функции

*А.А. Чугунов, А.А. Василевский*  
Эволюционная «гонка вооружений»:  
нейротоксины versus ионные каналы

*И.Г. Удина, О.Л. Курбатова, Ю.А. Васильев,  
А.С. Прудникова, .Ф Верапатвелян, О.В. Гуленко*  
Ошибки природы: «волчья пасть»  
и «заячья губа» побеждены?

## BIOLOGY AND MEDICINE

110 *M. V. Remizova*  
One or two: cotyledon number in  
Hydatellaceae - odd relatives of water-lilies

120 *I.A. Tarchevskiy, V.G. Yakovleva,  
A.M. Egorova., N.V. Petrova*  
How salicylic acid helps plants to  
create immunity against pathogens

129 *A.A. Makhrov, I.N. Bolotov, V.S. Artamonova*  
Freshwater pearl mussel: problems  
with adaptation

138 *I.A. Volodin, E.V. Volodina*  
Many deer, good, but... different!

146 *N.E. Zavialova*  
Pollen coats. What can they tell us about  
extinct ancestors of modern plants

153 *A.V. Poyakov, P.V. Borodin*  
The common shrew and its  
intraspecific hybrids

162 *L.V. Kozlova*  
How to extend an armored concrete?

169 *M.A. Kulakova*  
About talents to regenerate, «educated»  
worms and of fateful genes

178 *I.B. Aliyeva, R.E. Uzbekov*  
Cilia and flagella - geometric perfection,  
which determine functions

191 *A.A. Chugunov, A.A. Vasilevskiy*  
Evolutionary "arms race": neurotoxins  
versus ion channels

200 *И.Г. Удина, О.Л. Курбатова, Ю.А. Васильев,  
А.С. Прудникова, .Ф Верапатвелян, О.В. Гуленко*  
Ошибки природы: «волчья пасть»  
и «заячья губа» побеждены?

**НАУКИ О ЗЕМЛЕ**

- С.В. Кривовичев*  
Минералы как матрицы генетической информации: проверка гипотезы
- С.В. Попов, В.М. Котляков*  
Два чуда антарктического озера Восток
- Ю.Л. Войтеховский*  
Асимметрия – вот достойная проблема!
- А.Р. Косьян*  
Азиатская иммигрантка в Черном море
- Н.П. Маслова*  
Как «карта» современного дерева может помочь палеоботанику

**ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНЫЕ МЕТОДЫ  
ИССЛЕДОВАНИЙ В ГУМАНИТАРНЫХ  
НАУКАХ**

- М.Н. Вандышев, Н.В. Веселкова, Е.В. Прямикова*  
Моногород в представлениях жителей: между открытостью и безопасностью
- С.А. Панов, Е.А. Пахомова, А.В. Пахомов*  
Образование как основа экономики знаний
- В.А. Черванёва*  
Особенности наименования человека в мифологических рассказах, или Как зовут покойника?
- А.В. Борисов, Р.А. Мимоход, В.А. Демкин*  
Теория оптимального кризиса, или что кочевнику хорошо...
- Р.Х. Бахитова, И.У. Зулкарнай*  
Влияние размера заработной платы на мотивацию работодателей вводить инновации: агент-ориентированный подход
- О.А. Власова*  
Терапевтические сообщества: история и настоящее программ психиатрической взаимопомощи

**EARTH SCIENCES**

- 212 *S.V. Krivichev*  
Minerals as matrices for genetic information: checking the hypothesis
- 221 *S.V. Popov, V.M. Kotlyakov*  
Two miracles of the Antarctic Vostok Lake
- 228 *Y.L. Voytekhovskiy*  
Asymmetry - that is the true problem!
- 237 *A.R. Kosyjan*  
Asian immigrant in the Black Sea
- 251 *N.P. Maslova*  
How "map" of the modern tree can help the paleobotanist

**HUMAN AND SOCIAL SCIENCES**

- 256 *M.N. Vandysev, N.V. Veselkova, E.V. Pryamikova*  
Monotown in residents notions: between openness and safeness
- 263 *S.A. Panov, E.A. Pakhomova, A.V. Pakhomov*  
Education as a basis of the knowledge economy
- V.A. Tchervaniova*  
A person naming in oral mythological stories
- 271 *A.V. Borisov, R.A. Mimohod, V.A. Demkin*  
The theory of optimal crisis, or what is nice for nomad
- 278 *R.H. Bakhitova, I.U. Zulkarnai*  
Salary level influence on motivation of employers to introduce innovations: agent-based approach
- 292 *O.A. Vlasova*  
Therapeutic Communities: History and Present of Programs of Psychiatric Mutual Aid

**ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ  
СИСТЕМЫ**

*С.А. Маторин*  
Системный подход к личной жизни

*А.Н. Леухин*  
Обзор проблемы построения  
последовательностей Баркера

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ  
ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК**

*А.И. Пушкарёв, Ю.И. Исакова И.П. Хайлов*  
Генерация мощных ионных пучков

*В.В. Капранов, В.Ю. Тугаенко*  
Беспроводная передача электрической  
энергии на Земле и в космосе

**INFOCOMMUNICATION TECHNOLO-  
GIES AND COMPUTING  
SYSTEMS**

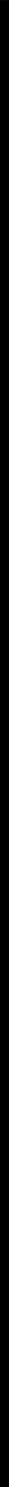
300 *S.A. Matorin*  
System approach to personal lives

*A.N. Leukhin*  
310 A Survey of the Design Problem for Barker  
Sequences

**FUNDAMENTAL PRINCIPLES  
OF ENGINEERING SCIENCES**

322 *A.I. Pushkariov, Y.I. Isakova, I.P. Hailov*  
Generation of intense ion beams

376 *V.V. Kapranov, V.Y. Tugaenko*  
Wireless energy transfer on Earth  
and in space.



**МАТЕМАТИКА,  
ИНФОРМАТИКА,  
МЕХАНИКА**

# Ухабы на дорожной карте математического моделирования

В.П. Ильин

*Валерий Павлович Ильин, главный научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, доктор физико-математических наук, профессор Новосибирского государственного университета, руководитель проекта РФФИ № 11-01-00205.*

## **Введение. Успехи порождают проблемы**

В Согласно закону Мура о компьютерной эволюции, 2013 г. является приблизительной «медианой» постпетафлопного периода: 2008 г. – время появления первого в мире «петафлопника», а через 11 лет, в 2019 г., прогнозируется рождение экзафлопной машины. На текущий момент можно сказать, что все идет по плану. Согласно объявленному в ноябре 2012 г. списку суперкомпьютеров TOP-500, в мире имеется 23 многопроцессорные вычислительные системы (МВС) с производительностью выше 1 пфс. (петафлопса, т.е. 1015 «усредненных» арифметических операций в секунду). Другие ключевые характеристики – это теоретическое, или пиковое, быстродействие, объем оперативной памяти, количество вычислительных ядер и потребляемая электрическая мощность. Например, самый мощный в мире компьютер ТИТАН имеет скорость 17,6 пфс., 560 640 ядер, память – 0,71 петабайт и энергопотребление – 8,2 Мвт.

На 2014 г. в мире уже запланировано появление компьютера с реальным быстродействием более 100 пфс., так что «пришествие»

экзафл–опника в 2019 г. наверняка состоится. Количественный рост технического оборудования приносит качественно новую ситуацию для математика-программиста. Во-первых, становится вполне реальным отказ какого-либо устройства во время исполнения алгоритма, и это необходимо учитывать при программировании. Во-вторых, стоимость электроэнергии оказывается очень существенной в общих расходах на эксплуатацию суперкомпьютера. Причем оказывается, что коммуникационные операции намного более энергозатратные, чем арифметические. Отсюда возникает новая проблема построения наиболее «дешевых» алгоритмов в необычном смысле этого слова, т.е. требующих наименьших обменов данными.

Естественно ожидать, что суперкомпьютер петафлопного уровня должен становиться центром коллективного пользования, или центром обработки данных, а сами расчеты могут проводиться в режиме удаленного доступа через Интернет. Такие технологии «облачных» вычислений уже становятся реальностью, и при этом пользователю зачастую предлагается не просто машинное время, а вычислительные услуги с программным обеспечением для решения требуемых задач. В результате какой-либо отраслевой организации уже нет смысла заводить собственный вычислительный центр и структурную службу, а лучше обращаться к «облаку».

Следует отметить, что если за последние 11 лет компьютерные мощности увеличились в 1000 раз, то отнюдь нельзя сказать, что за этот период выросла массовость эффективного применения математического моделирования хотя бы в 100 раз, в том числе и в России. Сейчас в мире существует многомиллиардный рынок прикладных программных пакетов для моделирования самых разных процессов и явлений. Как правило, такие ППП разрабатываются коллективами из многих десятков человек в течение нескольких десятилетий. Широко известны, например, коммерческие продукты MSC NASTRAN, ANSYS, COMSOL, которые успешно используются в задачах гидродинамики, упругопластичности, электрофизики и т.д. Как правило, идеологически – это закрытые инновации [1], почти не приспособленные к модификации пользователями, желающими их адаптировать к своим конкретным условиям. Кроме того, в Интернете имеется большое количество общедоступных программных библиотек и вычислительно-информационных инструментариев, решающих некоторые необходимые, но частные проблемы моделирования. Грубо говоря, имеется огромный программный «зоопарк», и конечному пользователю надо потратить слишком много времени для изучения объемных технических материалов, что практически невозможно для эксперта в предметной профессиональной области.

Ситуация значительно усугубляется, когда речь идет о необходимости эффективного распараллеливания алгоритмов на современных МВС сложнейшей архитектуры. С одной стороны, это неизбежно повышает требования к уровню знаний пользователя, но главное – разработчикам фактически приходится создавать новое поколение прикладного математического и программного обеспечения, рассчитанное на эффективное использование миллионов вычислительных процессоров и ядер. Именно данная проблема ставится во главу угла в Дорожной карте IESP – Международного проекта экзамасштабного программирования. Сейчас эта деятель-

ность расширяется за счет EESI – Европейской экзапроблемной инициативы, а также за счет подключения Национальных экзамасштабных программ Японии и Китая. Критическая проблема в области высокопроизводительных вычислений – это кадры, поскольку цивилизованное сообщество оказалось не готово к техническому прорыву в производстве суперкомпьютеров. Для преодоления этой болезни роста нужны целенаправленные скоординированные усилия в создании новых массовых профессий – разработчиков математического и прикладного программного обеспечения и его квалифицированных пользователей, включая вооруженных современными информационными технологиями физиков, химиков, биологов, машиностроителей и т.д.

### **Четыре инкарнации, или ипостаси, математики**

Главная особенность суперкомпьютерного развития заключается в том, что человечество получило доселе невиданные возможности решения сверхзадач – прямых и обратных, междисциплинарных, с реальной адекватностью моделей и высоким разрешением результатов, – которые открывают новые пути к прорывным фундаментальным знаниям и технологическим инновациям.

Важно понимать, что в этом историческом процессе ключевую роль играет математизация всех научно-производственных сфер, причем в большинстве случаев технологический прогресс в какой-то отрасли связан именно с тем, насколько успешно здесь применяются компьютерные расчеты. Понятно, что сегодня роли и технологии внедрения математики должны быть переосмыслены. В США именно с этой целью создана Рабочая группа по «экзамаматематике». Перед входящими в нее экспертами поставлены следующие задачи:

- проанализировать потенциальные расхождения в понимании миссии прикладной математики для экзавычислений;
- идентифицировать новые алгоритмические подходы, которые ориентированы на экзамасштабные вызовы;
- осмыслить математические возможности для решения новых фундаментальных проблем посредством интегрирования различных математических дисциплин;
- сформировать целостную кооперативную концепцию экзамаматематических исследований, которая включала бы диалог ученых из прикладных областей с учеными-вычислителями.

Чтобы попытаться вникнуть в суть поставленных вопросов, мы представим четыре инкарнации, или ипостаси, математики, которая, как известно, является и царицей наук, и слугой всех наук.

Начнем рассмотрение с теоретической математики, которая закладывает для нас основания о сути изучаемых проблем. Другими словами, речь идет о формировании, изучении и обосновании математической модели процесса или явления: естественного происхождения, научно-технического или социального. Надо сказать, что за последние десятилетия произошло идеологическое сближение теоретических физиков и математиков, и здесь на стыке наук получены замечательные результаты в области топологических мето-

дов, гомологий, внешней алгебры и дифференциальных форм, гамильтонова формализма, прикладной теории групп, дифференциально-геометрического исчисления и т.д. Эти достижения только относительно недавно начали внедряться в приложения, и их широкое воплощение в алгоритмы как раз совпадает исторически с переходом на пета- и экса-компьютеры.

Вторая инкарнация – это вычислительная математика, обеспечивающая нас методами и технологиями получения приближенных численных решений. Данный этап заключается в превращении математической модели в вычислительную модель. Отметим, что эта фундаментальная наука пересекается со смежной областью – информатикой, а структурно делится на свою теоретическую и экспериментальную части. Если в первом случае мы имеем теоремы об аппроксимации, устойчивости, гарантированных оценках точности, вычислительной ресурсоемкости и т.д., то вторая часть – это обязательная проверка теории практикой. В более чем полувекковой эпохе перманентной компьютерной революции численные методы переживают бурное развитие, и последние десятилетия не являются исключением. Дискретные формы и внешние конечно-элементные исчисления, методы преобразования графов и символьные вычисления, геометрические численные интеграторы, симплектические алгоритмы решения гамильтоновых систем – вот неполный перечень новых направлений, которые в совокупности с недавними, но ставшими уже классическими, достижениями XX в., составляют современное поколение алгоритмов решения уравнений математической физики. Важно подчеркнуть, что как теоретическая, так и вычислительная математика представляют весь свод математических знаний по прикладным задачам, но каждая из них имеет дело со своими объектами, терминами и целями исследований. А поскольку науки не стоят на месте, то в нашем случае следует исключительно значимый для практики вывод: совокупности математических и вычислительных моделей представляют не застывшие, а динамически меняющиеся структуры, и данная объективная сущность должна гибко поддерживаться средствами их реализации. Что касается численных методов, то с ними ситуация еще «усугубляется» необходимостью их распараллеливания и инвариантного отображения на архитектуры непрерывно меняющихся суперкомпьютеров [2].

Главная ипостась в рассматриваемой нами цепочке – это математическое моделирование, т.е. проведение численных экспериментальных исследований, которые осуществляются на конкретной МВС средствами прикладного программного обеспечения. Понятие компьютерного, или вычислительного, моделирования является фундаментальным и заслуживает особого внимания, поскольку венцом математического творчества является изучение прикладного предметного объекта. Вычислительные эксперименты могут иметь самый разный исследовательский характер, но в первую очередь должны быть проведены методические расчеты на специально подобранных примерах, которые могли бы охарактеризовать качество применяемого орудия моделирования. Здесь спецификациями являются адекватность модели, погрешности и устойчивость методов, оценки и контроль гарантированной точности, вычислительная сложность и ресурсоемкость расчетов. Нахождение

этих характеристик сродни градуировке, или калибровке, инструментария, которая определяет производительность последующей деятельности и является неотъемлемой частью любой инженерной деятельности.

Что касается содержательных вычислений экстремального масштаба, то здесь можно, в первую очередь, выделить расчеты, направленные на получение новых фундаментальных знаний. Например, популярная сейчас проблема – моделирование эволюции или столкновения галактик, и задачи такого рода могут при желании полностью загрузить ресурсы любого суперкомпьютера. Среди практических суперзадач есть не менее критические, и сюда относятся прогностические проблемы, которые в принципе вряд ли будут решены окончательно: долгосрочный прогноз погоды и климата, землетрясений и экономических кризисов, а также различных техногенных катастроф. Однако наиболее востребованными должны быть «рутинные» проблемы: георазведка углеводородов и других полезных ископаемых, медицинские и фармакологические проблемы, материаловедение и нанотехнологии, традиционные и перспективные виды энергетики, проектирование новой техники в машиностроении, электронике, химических технологиях и т.д.

Потенциально применение моделирования в этих и других отраслях – это повышение производительности труда, снижение себестоимости и повышение качества продукции, уменьшение рисков и другие факторы, которые должны поднять планку востребованности суперкомпьютерных расчетов на небывалую высоту, чего в реальной жизни пока не происходит. Здесь можно назвать две основные причины. Первая – это качество инструментов моделирования, на чем мы подробно остановимся позже. Вторая проблема заключается в кадрах, являющимися экспертами в прикладных областях и призванных сделать квалифицированное моделирование своим постоянным атрибутом профессиональной деятельности.

Здесь надо развеять имеющиеся заблуждения, которым подвержены зачастую даже высококвалифицированные специалисты в своих научных или производственных отраслях (будем их условно называть физиками). Типичные рассуждения звучат так: «Мы сами все запрограммируем и посчитаем» или «Дайте нам программиста, и мы с ним все промоделируем». При этом зачастую добавляется или подразумевается: «Все равно математики ничего не понимают в наших задачах». Последнее утверждение, к сожалению, имеет место, и для этого есть объективные обстоятельства. Сейчас маловероятно появление энциклопедистов – уникальных людей, являющихся носителями всех знаний своей эпохи. И по этой же причине физику всей своей реальной жизни не хватит на то, чтобы профессионально овладеть современными вычислительными методами и технологиями. Существует и другая крайность: от математика-вычислителя требуют провести расчеты, образно говоря, завтра, хотя физическая задача может требовать действительно непростого вхождения в суть проблемы. И здесь фактически возникает необходимость преодоления возникшего языкового барьера между физиками и математиками.

В научном плане процесс общения заключается в обмене информацией и по определению является прерогативой информатики. В этом професси-

ональном кругу одни из самых популярных терминов – это трансляторы, конверторы, интерфейсы, в том числе «дружественный пользовательский интерфейс», – которые как раз и осуществляют взаимосогласованность разных программ или диалог между программой и человеком.

### **Вычислительная интегрированная среда**

Теперь обратимся к опущенной изначально инкарнации, миссия которой состоит в том, чтобы убрать существующие барьеры между математиками–вычислителями и практиками–«модельерами». Речь идет о создании для последних не просто «спасательного круга» в океане алгоритмической и программистской информации, а вполне комфортного операционного окружения, «закрывающего» от физика излишние для него детали и кардинально повышающего эффективность работы конечного пользователя. Мы рассматриваем формирование вычислительной инструментальной среды, или базовой системы моделирования БСМ [3], которая представляла бы общедоступный набор высокопроизводительных методов и технологий, поддерживающих все основные стадии крупномасштабного численного эксперимента:

- геометрическое и функциональное моделирование, т.е. интерактивное описание и модификация исходных постановок задач со сложными геометрическими объектами и контрастными материальными свойствами сред, задаваемых системами дифференциальных и/или интегральных уравнений, начально-краевыми условиями и целевыми функционалами для обратных задач;
- построение адаптивных неструктурированных сеток с возможностями локальных сгущений, многосеточных подходов и автоматической сбалансированной декомпозиции подобластей в целях распараллеливания;
- сеточные и спектральные аппроксимации исходных задач, включая методы конечных объемов и конечных элементов высокой точности;
- решение получаемых систем линейных и нелинейных алгебраических уравнений сверхвысоких порядков с масштабируемым распараллеливанием на МВС;
- оптимизационные алгоритмы условной минимизации для решения обратных задач;
- постобработка и визуализация результатов расчета;
- управление вычислительным процессом и средства принятия решений.

Совокупность программных реализаций этих инструментальных компонент представляет собой экосистему, не ориентированную на конкретные задачи. Но различные прикладные пакеты могут быть оперативно собраны из таких «строительных» блоков, наподобие интеллектуального детского конструктора LEGO. Подчеркнем, что отдельные компоненты данного программного окружения могут разрабатываться независимыми группами, а внутренние интерфейсы должны обеспечиваться согласованными структурами данных (геометрическими и функциональными, сеточными и алгебраическими, и т.д.).

Необходимо отметить, что сейчас в Интернете имеется информация о прототипах аналогичных проектов, например, FOAM и DUNE, однако эти разработки основаны на более ограниченных концепциях.

БСМ предполагается рассчитанной на длительный жизненный цикл и удовлетворяющей некоторым естественным требованиям:

- обеспечение высокого разрешения расчетов с автоматическим контролем гарантированной точности численных решений, а также отсутствие программных ограничений на число степеней свободы в практических задачах;
- отображение структуры алгоритмов на архитектуру гетерогенных МВС и масштабируемый параллелизм на всех стадиях вычислительного эксперимента, без программных ограничений на количество процессоров и ядер;
- расширяемость состава математических моделей, алгоритмов и технологических средств, поддерживающая гибкую адаптацию программного обеспечения к динамической эволюции постановок задач, численных методов и компьютерных платформ;
- совместимость с внешними программными продуктами на основе множественности представлений и конвертации форматов данных;
- поддержка интеллектуальных возможностей конфигурационного управления приложениями на основе концепции метамоделей и проблемно ориентированных языков программирования [4].

Принципиальным моментом является то, что базовая система моделирования создается как проект вычислительного сообщества, открытый и к согласованному участию в нем различных групп разработчиков, и к доступному использованию его содержания в конкретных приложениях. Объем предполагаемых в таком проекте работ, естественно, невозможно осуществить без строгой координации и широкой кооперации, с вовлечением ведущих математиков и программистов. Реальная организация такого окружения естественно может осуществляться в альянсе с имеющимися аналогичными проектами типа упомянутых выше FOAM и DUNE, а также при активном использовании распространенных в Интернете вычислительно-информационных инструментов (генераторов сеток, алгебраических решателей и др.).

## **Заключение. Что делать?**

Резюмируя, можно кратко поговорить на означенную в заголовке традиционную российскую тему. В данном случае вопрос ставится следующим образом: «Как поднять востребованность экстремального моделирования, т.е. значительно активизировать применение высокопроизводительных суперкомпьютеров для решения суперзадач в интересах фундаментальных прорывных проблем и создания новых эффективных отраслевых технологий?» Мы приведем три тезисных соображения на данную тему.

- Во-первых, необходимо изменить парадигму физика-теоретика, который в прошлом веке ассоциировался с человеком, вооруженным справочником таблиц, рядов и интегралов, логарифмической линейкой и ручкой. Сейчас уровень компетенции физика требует знания и умения пользоваться современными функциональными возможностями математического и программного обеспечения суперкомпьютеров. То же самое относится и к отраслевым менеджерам, ответственным за научно-технический прогресс в производствах.

- Во-вторых, необходимо создать новое поколение математического и программного обеспечения, которое стало бы массовым, эффективным и высокопроизводительным орудием моделирования. Главные три качества формируемой инфраструктуры: динамическая поддержка современных вычислительных методов и технологий, эффективная адаптация к непрерывно меняющимся суперкомпьютерным платформам и комфортные эксплуатационные характеристики. Непременное условие реализуемости такой большой разработки – фактически беспрецедентная кооперация и координация ее участников, а также интегрированность самых многообразных инструментальных компонент и приложений.
- Успешность рассматриваемого суперпроекта определяется не только вычислительно-информационными аспектами, но и организационно-финансовыми. Здесь, безусловно, требуется решать много непростых вопросов, и мы можем только обозначить некоторые из них. Стратегии подготовки кадров для суперкомпьютерных технологий в целом просматриваются. Открытыми же являются вопросы национальной поддержки и частных инвестиций, заинтересованности компаний – разработчиков информационных технологий и «тяжелых» игроков на рынке производства суперкомпьютеров.

Ключевой проблемой остается повседневное внедрение современных технологий математического моделирования в такие наукоемкие производства, как электроника, машиностроение, металлургия, новые материалы, разведка и добыча полезных ископаемых и т.д., которое зависит от осознания руководителями госкорпораций и «олигархами» того факта, что тотальные интеллектуальные супервычисления – это реальное ближайшее будущее. А те из круга лиц, принимающих решения, которые первыми придут к такому открытию, станут лидерами новой волны научно-технической революции. И если атрибуты недавних социальных потрясений: Интернет и мобильный телефон – базируются на операциях хранения и передачи информации, то теперь к ним добавляется третье звено – вычислительные преобразования.

## Литература

1. Чесбро Г. Открытые инновации. – М., изд. Поколение. – 2007.
2. Ильин В.П. Параллельные процессы на этапах петафлопного моделирования. – Вычислительные методы и программирование. – т.12, № 1. – 2011. С. 93–99.
3. Ильин В.П., Скопин И.Н. Технологии вычислительного программирования. – Программирование. – № 4, 2011. С 53–72.
4. Kleppe A. *Software Language Engineer. Creating Domain-Specific-Languages Using Metamodels.*–Addison-Wesley. – Boston. – 2008.

# Прорваться сквозь мезоуровень!

И.Н. Бородин

*Бородин Илья Николаевич,  
доктор физико-математических  
наук, профессор, главный научный со-  
трудник Института вычислитель-  
ной математики и математической  
геофизики СО РАН.*

*Профессор Новосибирского государ-  
ственного университета  
Проект РФФИ № 13-01-11503*

**М**еханика деформируемых твердых тел исторически развивалась быстрее, чем наука о материалах, но во второй половине XX в. их развитие стало идти параллельно, что обогатило обе эти науки. Теория упругих деформаций активно развивалась, начиная с работ Галилея и Гука, выполненных в XVII в., и была достаточно полно сформулирована к середине XIX в. в работах Коши и Пуассона [1]. Основы механики пластической деформации, рассматривающей необратимое изменение формы тела, были сформулированы в работах Мизеса [2] первой половины XX в. Будучи эмпирической наукой, опирающейся на открытые опытным путем закономерности, механика не смогла в рамках единого подхода описать деформацию твердых тел во всем диапазоне действующих нагрузок и скоростей. Обнаружился ряд парадоксов, которые не объяснялись с чисто механических позиций, что потребовало привлечения физических представлений для корректировки механических моделей. Сами же физические представления о природе необратимой пластической деформации стали развиваться значительно позже моделей механики. Физике твердого тела, рассматрива-

ющей его, как совокупность атомов, не более сотни лет, а физика пластической деформации начала активно развиваться только после Второй мировой войны [3,4]. Сейчас не вызывает сомнений роль дефектов кристаллической решетки как основных носителей пластической деформации, но долгое время эта основополагающая идея физики пластичности оставалась остро дискуссионной и имела не так много сторонников в научном сообществе. Глядя на многочисленные фундаментальные труды по теории упругости, теории дефектов, на создание большого количества инженерных комплексов, таких как LS Dyna или Ansys и их повсеместное внедрение для моделирования сложных технологических процессов в авиа- и машиностроении, создается впечатление, что физика пластической деформации представляет собой уже завершенную область исследований. Но при более глубоком рассмотрении оказывается, что в смысле понимания деформации вещества как эволюции сложной динамической системы механика твердого тела стоит едва ли не у истоков своего развития.

Основной вопрос механики твердого тела ставится элементарно: как связаны нагрузки, прикладываемые к телу с обратимыми (исчезающими при снятии этой нагрузки) и необратимыми (изменяющими его форму) деформациями? То есть, какую надо приложить силу, чтобы через определенное время получить ту или иную форму тела? Эта зависимость обычно записывается в терминах напряжения( $\sigma$ )-деформация( $\epsilon$ ) и имеет вид: , (1)

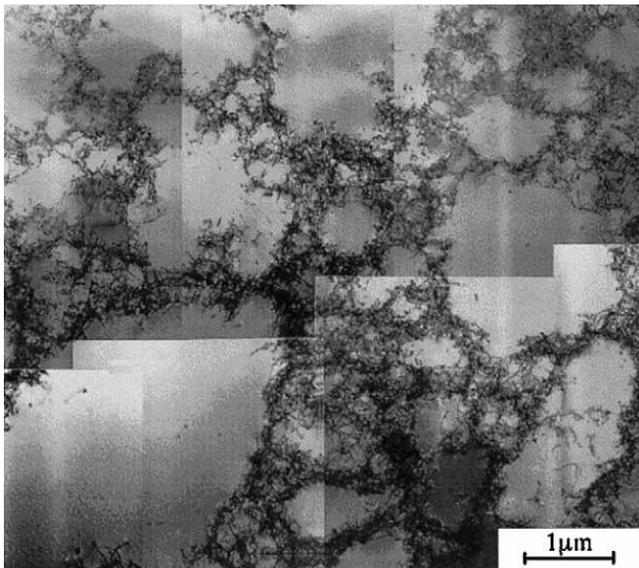
$$\sigma = f(\epsilon, \dot{\epsilon}, \dots) \cdot \epsilon$$

где  $\dot{\epsilon}$  обозначена скорость деформации. Определяющая функция  $f(\epsilon, \dot{\epsilon}, \dots)$  в общем случае зависит от величины и скорости деформации, температуры и других параметров; все эти параметры могут изменяться в процессе деформирования в довольно широких пределах. Если деформации линейны и обратимы, то при одноосном растяжении  $f(\epsilon, \dot{\epsilon}, \dots) = E$  и постоянная  $E$  называется модулем Юнга, а при чистом сдвиге функция  $f(\epsilon, \dot{\epsilon}, \dots)$  равна другой постоянной  $G$ , называемой модулем сдвига. Таким образом, эта функция зависит от способа приложения нагрузки, но для простейших упругих деформаций она всегда эмпирически определена некоторой постоянной величиной.

Совсем не так обстоит дело с произвольными упругопластическими деформациями, когда создаваемые в материале напряжения достигают большой величины и приводят к пластическим эффектам и необратимым формоизменениям, уменьшающим эти напряжения. Самый простой способ описать упругопластическую деформацию – представить функцию  $f(\epsilon, \dot{\epsilon}, \dots)$  в виде многочлена с постоянными коэффициентами, подбираемыми опытным путем. Этот метод представляет собой суть макроскопического или инженерного подхода к описанию деформации твердых тел и широко применяется на практике [5]. Однако он обладает одним существенным недостатком, также следующим из опыта. Оказывается, что модели с коэффициентами, подобранными из ряда конкретных экспериментов при одних условиях деформации, начинают давать значительные ошибки при попытке их применения для тех же материалов, но при значительно отличающихся условиях

деформации. Более того, оказывается, что не только набор параметров, но и сам вид определяющей функции должен зависеть, например, от скорости деформации. Наблюдаемое для чистых металлов упрочнение с повышением температуры [6, 7, 8] и недавно обнаруженное разупрочнение ультрамелкозернистых металлов при высоких скоростях деформации [9,10], эффекты инерционности развития пластической деформации, связанные с конечной скоростью движения дефектов [11], резкое изменение сдвиговой прочности металла при смене доминирующего механизма пластической деформации [12], полиморфные превращения в ряде металлов [4], а также явление локализации деформации в отдельных полосах сдвига [4], все эти эффекты не могут быть описаны в рамках моделей, не учитывающих реальную структуру твердого тела.

Но не только в непредсказуемых эффектах при высоких скоростях деформации выражается недостаточность одного только эмпирического подхода к проблеме. Одним из нашумевших открытий последних десятилетий стала возможность получать за счет двойникования и уменьшения зерен до размеров менее 1 микрометра одновременно пластичных и прочных металлов [13]. В рамках «классических» представлений это казалось невозможным. Хорошо известно, что увеличение количества дефектов в материале приводит к повышению его предела текучести, то есть критического напряжения, при достижении которого материал начинает необратимо деформироваться. При этом увеличивается и его хрупкость, то есть уменьшается прочность. Наоборот, чем мягче материал по отношению к пластической деформации, тем дольше он не разрушается. С антагонизмом пластичности и прочности мы сталкиваемся повсеместно: стекло очень хрупкое, но его форму без нагрева изменить практически невозможно, а глина или пластилин очень мягкие по отношению к любой внешней нагрузке, но долго тянутся и не рвутся. То же самое наблюдается в кузнечном деле, где при обжиге металла в печи количество дефектов в нем уменьшается и он становится мягким и пластичным, а при ударах молотом, наоборот, увеличивается и он становится твердым, но более



**Рис. 1.** Общая схема строения centrosомы у человека.

хрупким. Оказывается, что возможно создать одновременно пластичные и очень прочные металлические материалы за счет более сложного распределения дефектов в материале: формирования «бимодального» (то есть, имеющего два максимума) распределения зерен по размерам или создания большого числа микродвойников [13]. Для производства таких металлов необходима разработка технологических процессов формирования соответствующих дефектных структур и эта задача не может быть решена в рамках бесструктурного эмпирического подхода [14].

Вышесказанное ни в коей мере не является критикой подходов механики, но лишь констатацией их недостаточности самих по себе для описания целого ряда явлений деформации, имеющих как практический, так и фундаментальный интерес. Что же было обнаружено материаловедами «с другой стороны механики» в области физики дефектов? Во-первых, оказалось, что в материале существует целый мир дефектов, который при деформации, то есть при подводе энергии извне, «оживает». В нем происходит множество разнообразных событий, таких как рождение, уничтожение различных видов дефектов, их движение, взаимодействие друг с другом, образование сложных дефектных структур разных форм: стенок, ячеек, полос, решеток и так далее (*рис.1*) [3, 4, 15].

Большинство металлов оказались поликристаллами, состоящими из набора кристаллических (имеющих упорядоченное строение) зерен, отделенных друг от друга границами с малой степенью упорядоченности атомов [3]. Многие закономерности пластической деформации были объяснены на основе представлений о движении дефектов, которые свободно распространяются между границами зерен, примесями и границами дефектных структур [4]. Однако и этот подход сталкивается с определенными трудностями. Оказалось, что законы движения дефектов при высоких и низких приложениях к материалу нагрузках качественно отличаются. Сложным и до сих пор до конца не решенным остается вопрос размножения дефектов и их взаимодействия с границами зерен. Пластическая деформация чаще всего связана с движением дислокаций – линейных дефектов кристаллической решетки. Но во многих металлах помимо скольжения дислокаций могут активироваться и другие механизмы пластичности: двойникование, проскальзывание зерен по их границам, динамическая рекристаллизация – изменение размера зерна в процессе деформации [4].

Компьютерное моделирование с детальным описанием всех процессов микроуровня (движение и взаимодействие отдельных дефектов) в принципе позволило бы точно определить отклик материала на любое внешнее воздействие и найти зависимость между напряжением и деформацией для любых материалов. Но сложность происходящих процессов и количество отдельных дефектов (общая протяженность дислокаций, например, в одном кубическом сантиметре обычно составляет десятки и сотни миллионов метров) делают такой «прямой» подход бесперспективным для моделирования макроскопических объемов вещества и времен деформации. К тому же, здесь возникает проблема начальных условий, знакомая физикам еще со времен становления статистической физики. Даже определение средней плотности

дислокаций, концентрации пор или объемной доли двойников в материале является сложной экспериментальной задачей, для решения которой требуется изготовить тонкие фольги и кропотливо исследовать множество образцов. Определить распределение всех этих дефектов по исследуемому образцу без его разрушения невозможно.

Тем не менее, такое прямое компьютерное моделирование может быть успешно применено к описанию деформации микроскопических объемов вещества в течение очень малого времени. Молекулярно-динамическое моделирование, когда движение отдельных атомов складывается в модель поведения реального вещества, позволяет исследовать процессы деформации в объемах, содержащих миллионы атомов, на временах обычно меньших одной наносекунды [16, 17]. Прямое сравнение с экспериментальными наблюдениями здесь чаще всего невозможно, но можно получить энергетические и кинематические характеристики движущихся дефектов. Многие серьезные ученые воспринимают молекулярную динамику весьма скептически из-за большого количества предположений и упрощений, используемых при таком моделировании. Но ряд эффектов, сначала предсказанных в рамках молекулярно-динамического моделирования, а затем обнаруженных экспериментально, заставляет признать его действенным и полезным инструментом исследования [17]. Другим примером применения микроскопического подхода является моделирование или аналитическое описание малых ансамблей дислокаций и других дефектов на основе общезначимого принципа минимума энергии системы в состоянии устойчивого равновесия [18]. В рамках этого подхода оказывается возможным рассмотреть взаимодействие множества дислокаций, учесть влияние границ зерен и исследовать виды дефектных структур, образующихся в результате взаимодействия различных дефектов, что непосредственно может использоваться для интерпретации опытных данных. Но данный подход не позволяет решить полную задачу с обратной связью, то есть, рассмотреть взаимное влияние дислокационных процессов на внешние напряжения, а внешних напряжений на микропроцессы. В этом состоит недостаточность микроструктурных подходов, которые в итоге оказываются не связанными с реальными процессами деформации материалов на макроуровне.

Таким образом, с одной стороны, мы имеем экспериментальные данные и возможность их моделирования «в общих чертах» в рамках механики сплошных сред, что дает зависимость макроскопических параметров друг от друга. С другой стороны, имеются данные молекулярно-динамического и структурного моделирования, которые отвечают на вопрос о динамике отдельных дефектов кристаллической решетки и энергии их взаимодействия. Теперь мы переходим к главной теме этой статьи. К той пропасти в наших знаниях и возможностях, которая лежит на границе между микроуровнем – поведением отдельных дефектов и макроуровнем, то есть, деформацией всего образца как целого. Он был назван мезоскопическим, или просто мезоуровнем, который можно определить как масштаб, на котором происходят процессы взаимодействия различных видов дефектов друг с другом и важны их коллективные свойства. Многие книги и статьи последних десятилетий

были посвящены этой проблеме. Но на вопрос о том, как можно в рамках одного подхода описать деформацию на всех масштабах: от микро- до макроскопического, – до сих пор нет удовлетворительного ответа. Одной из плодотворных идей на этом пути стала идея «полевого» описания дислокаций, то есть «размазывания» отдельных дислокаций по некоторому малому объему с заданной функцией распределения, что, например, типично для квантовой механики и современной физики вообще. При этом можно следить не за динамикой каждой отдельно взятой дислокации, а за изменением некой средней функции их распределения. В этом подходе активно используется математический аппарат теории групп, что делает математику сложной, а главное, едва ли приводит к ярким практическим результатам, ограничиваясь обычно лишь физической интерпретацией уже известных явлений [19]. В последние годы появились работы, в которых для отдельных частных случаев удалось совместить в одном исследовании микроструктурное (даже молекулярно-динамическое) моделирование в малых частях рассматриваемого материала с моделированием в рамках механики сплошной среды для основной части материала. Примером является микроструктурное моделирование малой области на конце растущей в материале трещины [20]. Естественными также являются попытки записать специально подобранные термодинамические потенциалы для материала с дефектами и решить задачу статистически – аналогично тому, как это было сделано Гиббсом при создании им статистики идеальных газов. Такие подходы дают достаточно глубокое понимание процессов деформации и особенностей поведения материала, позволяя качественно предсказать важные эффекты, возникающие при развитии пластической деформации [21]. Но на этом пути встречаются и серьезные трудности: приходится использовать полуэмпирические соотношения для фазовых переходов типа Гинзбурга-Ландау [22]. В результате, при объединении этих моделей с моделями сплошной среды для описания конкретных инженерных задач получается система дифференциальных уравнений с 10–13 неизвестными параметрами, которые довольно сложно подобрать из эксперимента.

В рамках проекта РФФИ была поставлена задача построения моделей пластической деформации, объединяющих микро- и макроскопические подходы. Предполагалось для микроуровня использовать хорошо разработанные [4, 23, 24] и достаточно простые модели, ценность которых, по словам Чарлза Киттеля «сложно переоценить», а на макроуровне решать задачу в рамках механики сплошной среды. Необходимо перекинуть некий мост, связывающий микро- и макроуровни – движение отдельных дефектов и пластическую деформацию всего материала в целом. Обращаясь для наглядности к термодинамике, можно вспомнить, что там таким мостом служит ее знаменитое первое начало, объединяющее в одном уравнении движение молекул в виде внутренней энергии и чисто механическую работу, которую совершает вся система или которая совершается над ней. Подобный мост в механике материалов можно проложить, если несколько видоизменить основное соотношение (1) и записывать его не для самих величин напряжения и деформации, а для скоростей их изменения, то есть для первых производных по

времени. В этом случае можно считать, что за бесконечно малое время физически малый объем вещества деформируется чисто упруго за счет неоднородного макроскопического движения и одновременно с этим действующие в материале напряжения пластически релаксируют за счет движения дефектов. Тогда можно записать

$$\dot{\sigma} = 2G \cdot (\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_{pl}) \quad (2)$$

где предполагается, что происходит макроскопическая деформация чистого сдвига  $\varepsilon$  со скоростью деформации  $\dot{\varepsilon}$  и параллельно ей – пластическая деформация со скоростью  $\dot{\varepsilon}_{pl}$ . В общем случае напряжение и деформация представляют собой тензоры второго ранга и характеризуют состояние вещества в физически малом объеме. Для дислокационной пластичности в таком малом объеме можно посчитать полную длину дислокационных линий, равную их скалярной плотности  $\rho_D$ , усреднить скорость движения дислокаций, обозначив ее величиной  $V_D$  и записать известное соотношение Орована для скорости пластической деформации, связанной с движением дислокаций в виде:

$$\dot{\varepsilon}_{pl}^D = \rho_D b V_D, \quad (3)$$

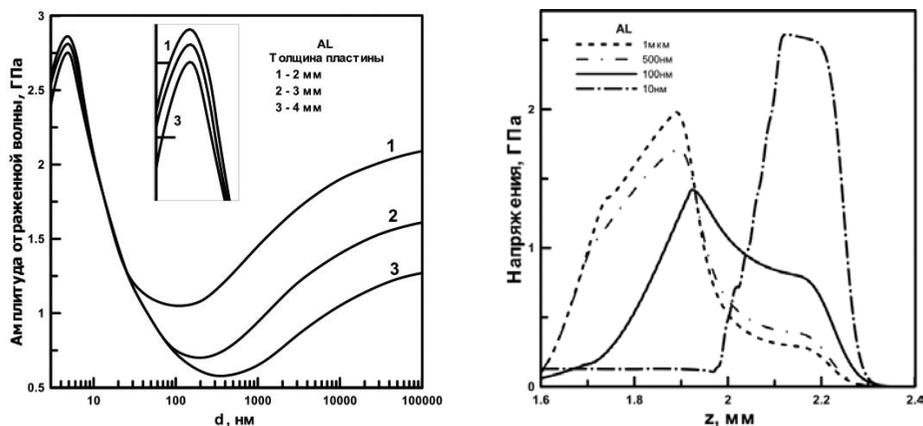
где произведение скорости и плотности дислокаций умножается на модуль вектора Бюргера – величину порядка постоянной кристаллической решетки. Скорость пластической деформации (3) будет определена, если будут известны  $\rho_D$  и  $V_D$ . Для их определения можно теперь записать уравнения на микроуровне – уровне существования дефектов, то есть на масштабах порядка нанометров. Необходимые при этом константы уравнений движения и размножения дефектов могут быть найдены из описанных выше молекулярно-динамических расчетов или из энергетического рассмотрения.

Подобным образом можно записать уравнения для других типов дефектов и представить полную скорость пластической деформации, как сумму скоростей деформаций, соответствующих разным типам дефектов. Например, можно записать, где рассмотрено выше, обусловлено проскальзыванием зерен по границам, связано с двойникованием. Для построения полной модели необходимо также рассмотреть различные особенности этих процессов: учесть, например, наличие «гомогенного» зарождения дислокаций – их образования прямо из идеальной кристаллической решетки при больших напряжениях сдвига, или вращение нанокристаллических зерен. Для дислокаций и границ зерен подобный анализ был проведен в работах [11, 12, 24, 25].

Так как образование любых дефектов связано с изменением поля упругих сил внутри материала, то на их зарождение тратится энергия, которая является универсальной мерой и сохраняется как на микро-, так и на макроуровне. При пластической деформации механическая энергия переходит во внутреннюю и может расходоваться либо на образование новых дефектов, либо рассеиваться в материале в виде тепла. Энергию, вложенную в материал, посчитать легко. Например, в случае соударения движущегося и неподвижного кусков металла

она просто равна кинетической энергии движущегося куска. Энергия, запасаемая при упругой деформации, определяется величиной упругого модуля и также известна. Нагрев материала можно посчитать по изменению его температуры, а значит можно узнать и долю энергии, которая уходит на образование дефектов. В многочисленных экспериментах было установлено, что эта доля составляет порядка 10% [3] от всей энергии пластической деформации. Тогда, зная упругую энергию одного дефекта, можно решить самую сложную задачу – из механических характеристик посчитать увеличение числа дефектов в материале. Потом можно записать уравнение движения отдельно взятого дефекта, воспользовавшись вторым законом Ньютона или формализмом Лагранжа. Взаимодействие между дефектами может быть учтено отдельно в виде дополнительной силы, действующей на движущиеся дефекты – эти выражения хорошо известны как уравнения для статического предела текучести материала и определяются на основе известных эмпирических закономерностей, таких, как законы Тэйлора и Холла-Петча [4].

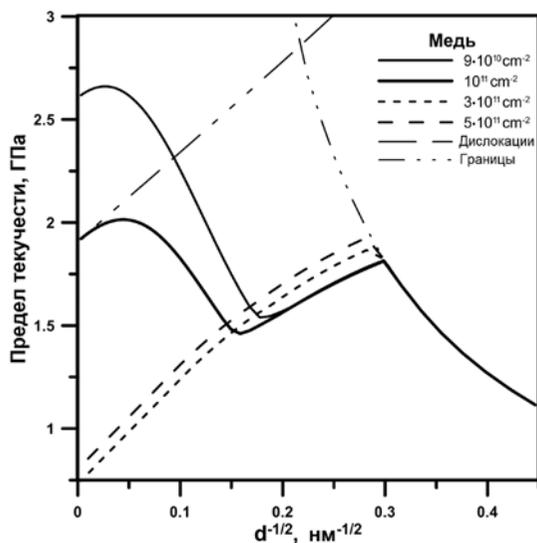
Результатом применения такого подхода стала возможность моделирования пластичности металлов в широком диапазоне скоростей деформации, размеров зерен и начальных плотностей дислокаций. Проверка моделей может быть проведена путем сравнения профилей ударных волн, временных зависимостей скорости тыльной поверхности (в экспериментах по столкновению пластин) или максимально достигаемых в материале напряжений с соответствующими экспериментальными данными. Проведенное сравнение для ряда экспериментов показало хорошее соответствие расчетов, как для случая, когда деформация происходит только посредством дислокационного скольжения [11], так и в наноматериалах при зернограничном проскальзывании [25]. Объединение микро и макроскопического уровня позволило также сделать ряд предсказаний о переходных режимах, когда доминирующее влияние одних видов дефектов, например дислокаций, сменяется другим – зернограничным проскальзыванием или двойникова-



**Рис. 2.** Зависимость амплитуды отраженной волны и профиля ударной волны от размера зерна и в алюминии [26]

нием [12]. С дислокационных позиций был объяснен эффект уменьшения предела текучести металлов при повышении температуры [8]. При высоких скоростях деформации были предсказаны интересные нелинейные зависимости предела текучести и амплитуды ударной волны от размера зерна в меди и алюминии (рис. 2).

Промоделирован эффект уменьшения динамического предела текучести (рис. 3) в области ультрамелкозернистых металлов [10], аналогичный наблюдаемому в недавних экспериментах [9] по соударению металлов. Расчеты показывают, что соответствующее падение динамических сдвиговых напряжений в области размеров зерен 0,1–0,5 мкм (рис. 3) может быть



**Рис. 3.** Зависимость максимальных сдвиговых напряжений, достигаемых в меди, от размера зерна для разных начальных плотностей дислокаций в материале при скорости деформации 108с<sup>-1</sup> [10]

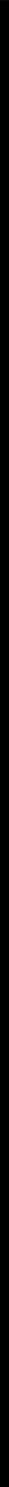
связано с механизмом зернограничного проскальзывания. При квазистатической деформации этот механизм оказывает влияние на пластическую релаксацию только при размерах зерен порядка десятков нанометров. Также в рамках проекта было показано, что известный механизм гомогенного зарождения дислокаций эффективен только для достаточно узкого диапазона скоростей деформации материала. Все эти эффекты, полученные в результате численного моделирования, позволяют предложить физическую интерпретацию соответствующих экспериментальных данных, а также определить значение предела текучести материала в широком диапазоне его свойств и параметров нагружения.

Таким образом, «отсекая все лишнее» и находя переходные звенья между микроскопическим миром дефектов и нашим макромиром физических параметров, мы можем значительно лучше понять многие «удивительные» на первый взгляд эффекты, наблюдаемые в экспериментах по деформации различных металлов. Для их объяснения не требуется привлекать новую физику, а лишь лучше понять роль малых частей в большом и сложном процессе пластической деформации.

**Литература:**

1. *Lowe A.E.H.* A treatise on the mathematical theory of elasticity. // Cambridge university press. – 1927. – 675p.
2. *Mises R.* Mechanik der festen Körper im plastisch deformablen Zustand. // Göttin. Nachr. Math. Phys. – 1913. – V. 1. – P. 582–592.
3. *Куттель Ч.* Введение в физику твердого тела: монография // М.: Наука. – 1978. – 792 с.
4. *Meyers M.A., Chawla K.K.* Mechanical Behavior of Materials. // Cambridge University Press, New York. – 2009. – 856 p.
5. *Zerilli F.J.* Dislocation mechanics-based constitutive equations. // Metallurgical and materials transactions A. – 2004. – V. 35A. – P. 2548–2555.
6. *Канель Г.И., Фортвов В.Е., Разоренов С.В.* Ударные волны в физике конденсированного состояния // УФН. – 2007. – Т. 177 (8). – С. 809–830.
7. *Груздков А.А., Петров Ю.В., Ситникова Е.В.* Аномальное поведение предела текучести при повышении температуры в условиях высокоскоростного деформирования // Доклады РАН. – 2007. – Т. 417. – С. 493–496.
8. *Красников В.С., Куксин А.Ю., Майер А.Е., Янилкин А.В.* Пластическая деформация при высокоскоростном нагружении алюминия: многомасштабный подход // Физика твердого тела. – 2010. – Т. 52 (7). – С. 1295–1304.
9. *Разоренов С.В., Канель Г.И., Гаркушин Г.В., Игнатова О.Н.* Сопротивление динамическому деформированию и разрушению тантала с различной зеренной и дефектной структурой. // Физика твердого тела. – 2012. 56 (4). – С.742–749.
10. *Borodin E.N., Mayer A.E.* Abnormal Hall-Petch relation in ultrafine-grained copper and aluminum at extremely high strain rates // Materials of XXVIII International conference on interaction of intense energy fluxes with matter. – Elbrus. – 2013.
11. *Krasnikov V.S., Mayer A.E., Yalovets A.P.* Dislocation based high-rate plasticity model and its application to plate impact and ultrashort electron irradiation simulations. // International Journal of Plasticity. – 2011. – V. 27 (8). – P. 1294–1308.
12. *Бородин И.Н., Майер А.Е.* Предел текучести нанокристаллических металлов при высокоскоростной пластической деформации // ФТТ. – 2012. – Т. 54 (4). – С. 759–766.
13. *Valiev R.Z., Alexandrov I.V., Zhu Y.T., Lowe T.C.* Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation. // J. Mater. – Res. 2002. – V. 17 (1). – 5–8.
14. *Бородин И.Н., Майер А.Е.* Локализация пластической деформации в процессе динамического канального углового прессования. // ЖТФ. – 2013. – Т. 83 (8). – 76–80.
15. *Zaiser M., Hähner P.* The flow stress of fractal dislocation arrangements. // Material Science and Engineering A. – 1999. – V.270. – 299–307.
16. *Куксин А.Ю., Стегайлов В.В., Янилкин А.В.* Атомистическое моделирование пластичности и разрушения нанокристаллической меди при высокоскоростном растяжении. // Физика твердого тела. – 2008. – Т. 50 (11). – С. 1984–1990.
17. *Wolf D., Yamakov V., Phillpot S.R., Mukherjee A., Gleiter H.* Deformation of nanocrystalline materials by molecular-dynamics simulation: relationship to experiments? // Acta Materialia. – 2005. – V. 53. – P. 1–40.
18. *Гуткин М.Ю., Овидько И.А.* Дефекты и механизмы пластичности в наноструктурных и некристаллических материалах. // Санкт-Петербург. – Янус. – 2000.

19. Гриняев Ю.В., Псахье С.Г., Чертова Н.В. Фазовое пространство деформируемых тел. // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т.11 (3). – С. 37–43.
20. Brinckmann S., Mahajan D.K., Hartmaier A. A scheme to combine molecular dynamics and dislocation dynamics. // Modelling Simul.Mater.Sci.Eng. – 2012. – 20:045001.
21. Наймарк О.Б. Коллективные свойства ансамблей дефектов и некоторые нелинейные проблемы пластичности и разрушения. // Физическая мезомеханика. – 2003. – Т. 6 (4). – С. 45–72.
22. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том V: Статистическая физика. // М.: Наука. – 2003.
23. Хирт Д.П., Лоте И. Теория дислокаций. // М.:Мир. – 1975.
24. Дудоров А.Е., Майер А.Е. Уравнения динамики и кинетики дислокаций при высоких скоростях пластической деформации. // Вестник Челяб. гос. ун-та. – 2011. – Т. 39 (12). – Физика. – С. 48–56.
25. Borodin E.N., Mayer A.E. A simple mechanical model for grain boundary sliding in nanocrystalline metals // Materials Science and Engineering: A. – 2012. – V. 532. – P. 245–248.
26. Бородин И.Н., Майер А.Е. Моделирование затухания ударных волн в нанокристаллических металлах // Вестн. Челяб. гос. ун-та. – 2011. – Т. 38 (11). – Физика, С. 31–0.



**ФИЗИКА  
И АСТРОНОМИЯ**

# Силы Казимира между наноструктурами

А.И.Волокитин

*Волокитин Александр Иванович,  
доктор физико-математических  
наук, профессор кафедры физики  
Самарского государственного тех-  
нического университета.  
Проект РФФИ № 13-02-11500*

Открытая более 60-ти лет назад поразительная связь между флуктуациями и силами теперь повсеместно применяется в физике. В настоящее время интерес к силам Казимира испытывает своеобразный «ренессанс», что связано с созданием техники ультрачувствительной регистрации сил и активной разработкой наноэлектромеханических систем. Недавно было показано, что те же самые флуктуации электромагнитного поля, которые приводят к силам Казимира, при относительном движении тел приводят к трению Казимира.

## Флуктуации приводят к взаимодействию

Существуют четыре известных фундаментальных взаимодействий: электромагнитное, гравитационное, слабое и сильное. Слабое и сильное взаимодействия проявляют себя в масштабах порядка размеров ядра, в то время как при больших расстояниях превалируют электромагнитные и гравитационные силы. Поэтому оказалось неожиданностью то, что два макроскопических немагнитных и незаряженных тела даже при отсутствии у них постоянного дипольного момента могут испытывать силу притяжения, значительно превышающую силу гравитации. Эта сила была предсказана в конце

1940-х гг. Генриком Казимиром и в настоящее время она носит его имя. Существование этой силы является одним из немногих проявлением квантовой механики; другими являются сверхтекучесть, сверхпроводимость, каонные и нейтринные осцилляции и спектр излучения абсолютно черного тела.

Природа сил Ван дер Ваальса и Казимира связана с квантовыми и тепловыми флуктуациями. Квантовые флуктуации обусловлены соотношением неопределенностей

Гейзенберга, согласно которому движение в квантовой системе не останавливается даже при  $T=0$  К, а тепловые флуктуации связаны с тепловым движением микрочастиц. неполярная молекула всегда имеет флуктуирующий дипольный момент за счет квантовых и тепловых флуктуаций. Флуктуирующее электрическое поле, создаваемое этим флуктуирующим дипольным моментом, будет индуцировать дипольный момент в расположенной на расстоянии  $d$  соседней молекуле. Взаимодействие между флуктуирующим и индуцированным дипольными моментами молекул приводит к дальнедействующему, «дисперсионному» взаимодействию Ван дер Ваальса, которое соответствует притяжению и при малых расстояниях  $d < \lambda_0 = c/\omega_0$ , где  $c$  – скорость света и  $\omega_0$  – частота поглощения молекулы, меняется с расстоянием как  $d^{-6}$ . Однако при больших расстояниях ( $d > \lambda_0$ ) должны учитываться эффекты запаздывания, связанные с конечностью скорости распространения света, что приводит к взаимодействию Казимира-Полдера, которое при больших расстояниях меняется как  $d^{-7}$ .

Генрик Казимир обосновал свое предсказание в рамках упрощенной модели, в которой рассматривались две параллельные идеально проводящие пластины, разделенные вакуумом. Рассматривая вклад мод электромагнитного поля в энергию нулевых колебаний, Казимир предсказал силу притяжения между пластинами. Так как в пространстве между пластинами могут существовать только электромагнитные моды, которые имеют узлы на поверхности пластин, то частоты мод зависят от расстояния между пластинами, что приводит к силе

$$\frac{F_C}{A} = \frac{\hbar c \pi}{240 d^4} = \frac{1.3 \times 10^{-27}}{d^4} \text{Нм}^2,$$

где  $A$  – площадь пластин. На расстояниях порядка 10 нм действие силы Казимира эквивалентно действию атмосферного давления (101,3 кПа). Сила в данном случае соответствует притяжению, так как плотность мод в свобод-

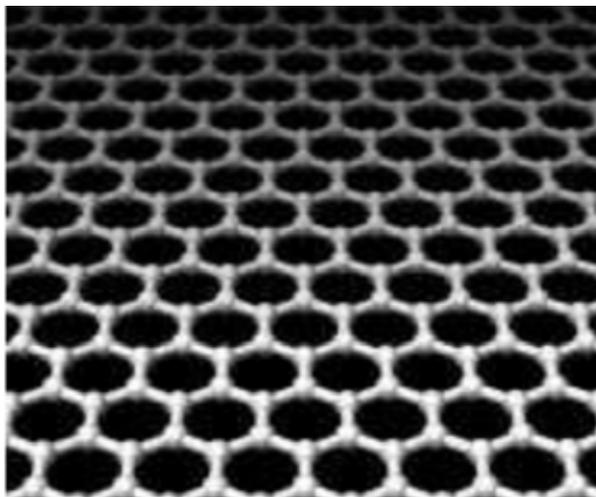


Рис. 1. Сотовидная решетка графена

ном пространстве больше, чем между пластинами. Единая теория сил Ван дер Ваальса и Казимира между плоскими параллельными пластинами, разделенными вакуумной щелью в условиях теплового равновесия, была разработана Лифшицем (1955). Для расчета флуктуирующего электромагнитного поля Лифшиц использовал теорию Рытова (1953). Сила Казимира определяется суммой вкладов за счет квантовых и тепловых флуктуаций. Квантовые флуктуации доминируют при малых расстояниях ( $d < l_T = ch\hbar/kBT$ ), а тепловые флуктуации доминируют при больших расстояниях ( $d > l_T$ ). В противоположность от вклада в силы Казимира за счет квантовых флуктуаций, который изучается экспериментально уже давно, тепловой вклад в силы Казимира был измерен только недавно, и эти измерения подтвердили предсказания теории Лифшица.

### Силы казимира в графеновых системах

Графен, изолированный монослой углерода, который научились получать совсем недавно<sup>4</sup>, состоит из атомов углерода, плотно упакованных в двумерную сотовидную кристаллическую решетку (*рис. 1*). Уникальные электронные и механические свойства графена активно изучаются как теоретически, так и экспериментально из-за их важности для фундаментальной физики, а также возможных технологических приложений. В частности, валентная зона и зона проводимости в графене касаются друг друга в одной точке, называемой точкой Дирака. Вблизи этой точки энергетический спектр электронов и дырок имеет линейную дисперсию. За счет этой линейной (или «конической») дисперсии электроны и дырки вблизи этой точки ведут себя как релятивистские частицы, описываемых уравнением Дирака для безмассовых фермионов. За открытие и изучение замечательных свойств графена в 2010 г. Гейм и Новоселов были награждены нобелевской премией.

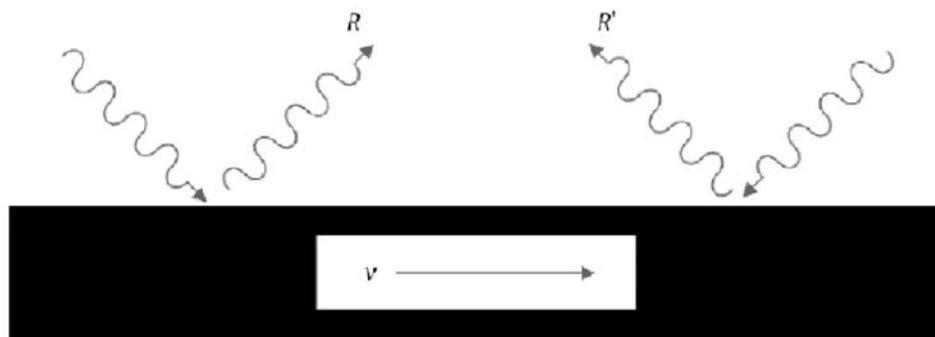
В настоящее время большое внимание привлечено к исследованию сил Казимира в графеновых структурах. Это связано с тем, что из-за необычных электронных свойств графена, силы Казимира в графеновых структурах также имеют необычные свойства. Для нормальных материалов вклад тепловых флуктуаций в силу Казимира доминирует при  $d > l_T$ , однако для двух графеновых листов тепловой вклад доминирует для значительно более коротких расстояний  $d > \zeta_T = \hbar v_F / k_B T$ , где  $v_F \sim 10^6$  м/с – скорость Ферми в графене. При комнатной температуре параметры  $\zeta_T$  и  $l_T$  равны 25 нм и 7,6 мкм, соответственно. На практике важное значение имеет возможность управления силами Казимира. Одна такая возможность управления тепловой силой Казимира связана с изменением концентрации носителей заряда в графене путем настройки уровня Ферми с помощью затворного напряжения. В графеновых структурах силами Казимира и радиационной передачей тепла можно также управлять, пропуская электрический ток в графеновом листе. За счет гигантской мобильности носителей заряда в графене в сильных электрических полях электроны (или дырки) могут двигаться с очень большой скоростью ( $\sim 10^6$  м/с). Дрейфовое движение носителей заряда в графене будет приводить к изменению диэлектрических свойств графена за счет эффекта Доплера (*рис. 1*).

Это будет приводить к изменению сил Казимира и радиационной передачи тепла. *Рис. 1а цветной вкладки* показывает зависимость силы

Казимира между двумя графеновыми листами от расстояния  $d$  между ними. Тепловые и квантовые вклады показаны раздельно. Тепловые вклады вычислялись при  $T=600$  К и для скоростей дрейфа  $v=0$  и  $v=2 \cdot 10^2$  м/с. Тепловые вклады становятся больше квантового вклада при  $d > 50$  нм. При  $d < 5$  нм тепловой вклад, вычисленный при  $v=2 \cdot 10^6$  м/с, значительно больше теплового вклада, вычисленного при  $v=0$ . Например, при  $d \approx 3$  нм дрейфовое движение электронов приводит к увеличению теплового вклада в силу Казимира на один порядок. В этом случае тепловой вклад только на один порядок меньше квантового вклада и может быть измерен экспериментально. **Рис. 1б цветной вкладки** показывает зависимость тепловой силы Казимира  $FzT$  от скорости дрейфа электронов в графеновом листе при  $d=1$  нм. Существенное изменение тепловой силы Казимира возникает при  $v/d > \omega_T = k_B T / \hbar$  (при комнатной температуре и для  $d=1$  нм это условие соответствует скоростям  $v > 105$  м/с). Это изменение особенно велико в случае резонансного туннелирования фотонов. В этом случае фотон, испускаемый движущейся электронной системой с энергией  $\omega_{ph}(q) = q_x v - \omega_{eh}(q)$ , где  $q_x$  – параллельная поверхности компонента волнового вектора  $q$ ,  $\omega_{eh}(q)$  – энергия возбуждения электронно-дырочной пары, будет создавать возбуждение с такой же энергией  $\omega_{eh}(q)$  в другом графеновом листе. В случае графена энергия возбуждения электронно-дырочной пары  $\omega_{eh}(q) \approx v_F q$ , где  $v_F$  – скорость Ферми. Резонанс возникает, когда  $q_x v > 2v_F q$ , что соответствует  $v > 2v_F \approx 2 \cdot 10^6$  м/с.

### Трение казимира

Уже более 30 лет физиков интересует вопрос о том, как видоизменяются взаимодействие Казимира-Лифшица и радиационная передача тепла



**Рис. 1.** Отражение электромагнитных волн от поверхности движущегося диэлектрика. Волны, которые распространяются в направлении движения и против него, будут испытывать противоположный сдвиг частоты за счет эффекта Доплера. Вследствие частотной дисперсии амплитуды отражения эти волны по-разному отражаются от поверхности движущегося тела, что приводит к изменению сил Казимира. Асимметрия отражения электромагнитных волн ответственна также за трение Казимира.

при учете относительного движения тел. Ряд исследователей показали, что относительное движение тел приводит к появлению силы трения. Теория предсказывает, что сила трения действует даже при абсолютном нуле температуры, когда она определяется квантовыми флуктуациями. Природа трения Казимира тесно связана с силами Казимира (*см. раздел I*). Если тела находятся в относительном движении, то поляризация, индуцируемая в теле, будет отставать от флуктуирующей поляризации в другом теле, которая является первоисточником индуцируемой поляризации. Это отставание лежит в основе трения Казимира. Взаимодействие Казимира в основном определяется обменом между телами виртуальными фотонами, связанными с квантовыми флуктуациями. Тепловые флуктуации начинают заметно сказываться на силах только при большом расстоянии между телами, когда вклад от квантовых флуктуаций становится очень мал. Напротив, трение Казимира определяется обменом между телами реальными фотонами. При малых скоростях скольжения ( $v < dk_B T / \hbar$ ) трение Казимира определяется обменом тепловыми фотонами, связанными с тепловым излучением. Однако при больших скоростях и низких температурах ( $v > dk_B T / \hbar$ ) трение Казимира определяется обменом фотонами, возникающих в результате относительного движения квантовых флуктуаций.

Природа трения Казимира может быть также объяснена эффектом Доплера. Согласно Дж. Пендри (1997), разница в доплеровском сдвиге частоты для двух волн, отражающихся от движущихся в противоположных направлениях поверхностей, приводит к трению, если амплитуда отражения зависит от частоты (*рис. 1*). С точки зрения квантовой механики трение Казимира определяется процессами двух типов. В процессе (*a*) возбуждения возникают в обоих телах, а в процессе (*b*) возбуждение исчезает в одном теле и рождается в другом. Первый процесс (*a*) возможен даже при нулевой температуре, когда он определяет квантовое трение. Второй процесс (*b*) возможен только при конечных температурах, когда он приводит к вкладу в трение Казимира за счет теплового излучения. Квантовое и тепловое трение Казимира определяются квантовыми и тепловыми флуктуациями, соответственно.

Важно отметить, что квантовое трение существует только между близко расположенными телами. Для тела, которое движется в абсолютном вакууме, квантовое трение (в отличие от теплового трения) равно нулю, в согласии с принципом относительности, согласно которому тело не может испытывать трения, если оно движется в абсолютном вакууме при  $T=0$  К.

### **Детектирование трения казимира с помощью графена**

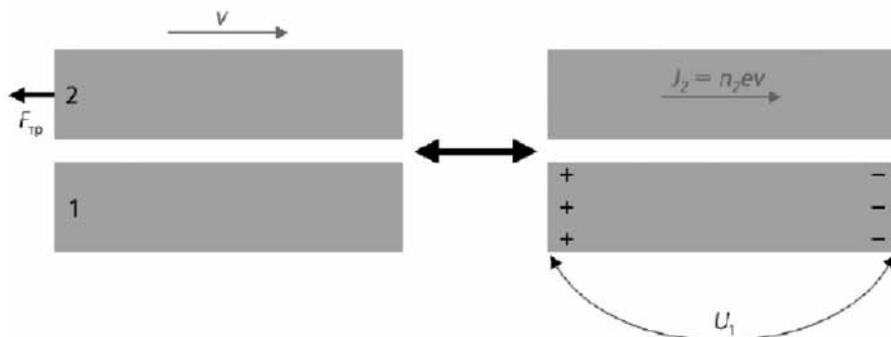
Трение Казимира определяет предел, до которого может быть уменьшено трение. Поэтому, для того, чтобы детектировать трение Казимира, необходимо уменьшить влияние других механизмов трения до беспрецедентного уровня. Однако даже в экспериментах по бесконтактному трению, когда тела не находятся в прямом контакте, имеются несколько конкурирующих механизмов трения. К тому же, квантовое трение доминирует над тепловым трением при скоростях  $v > dk_B T / \hbar$ , при  $d=1$  нм и комнатной темпе-

ратуре:  $v > 10^5$  м/с. Однако в экспериментах по измерению бесконтактного трения с помощью атомного силового микроскопа скорость наконечника не превышает 1 м/с.

Трение Казимира можно изучать не только с помощью измерения силы трения при относительном скольжении двух поверхностей. Другой, более элегантный способ наблюдения состоит в пропускании тока через одну металлическую пластину и изучении эффекта фрикционного увлечения в расположенном поблизости второй (параллельной) металлической пластине (*рис. 2*). Это явление, предсказанное независимо М.Б.Погребенским (1977) и П.Прайсом (1983), впервые наблюдалось для полупроводниковых 2D-квантовых ям Грамилой и др. (1991) и Сиваном и др. (1992). В этих экспериментах создается ток в одной пластине, а вторая пластина являлась частью разомкнутой цепи. За счет близости слоев межслойное взаимодействие посредством флуктуирующего электромагнитного поля (которое при малых расстояниях сводится к кулоновскому полю) будет приводить к силе трения, действующей на электроны во второй пластине.

Так как ток не мог протекать во второй пластине, то в ней возникало электрическое поле (т.е. напряжение) с напряженностью  $E$ , компенсирующее силу трения за счет взаимодействия с первой пластиной. В эксперименте дрейфовая скорость электронов  $v \sim 10^2$  м/с. Согласно теории трения Казимира, при таких скоростях основной вклад в силу трения дают тепловые флуктуации.

Фрикционное увлечение между графеновыми листами было измерено недавно в работах [6, 7]. В этих работах скорость дрейфа носителей заря-



**Рис.2.** Возникновение фрикционного сдвигового напряжения на поверхности двух металлов, разделенных вакуумным промежутком. Оно действует за счет переноса импульса между электронами посредством электромагнитных волн. Фрикционное сдвиговое напряжение между поверхностями двух металлов может быть также измерено, если их не передвигать (как слева), а приложить к одному из металлов (верхнему) напряжение, которое вызовет дрейфовое движение электронов проводимости (стрелкой показано направление движения электронов). Фрикционное напряжение, действующее на электроны другого металла, породит падение потенциала между противоположными торцами металла, которое может быть измерено экспериментально (справа).

да  $v$  тоже была малой, поэтому учитывался только тепловой вклад в силу фрикционного увлечения. Эксперимент по фрикционному увлечению с графеновыми листами имеет значительные преимущества по сравнению с квантовыми ямами. Такой эксперимент можно проводить в вакууме, когда легко исключить вклад во фрикционное увлечение за счет обмена фононами. Кроме того, 2D-квантовые ямы в полупроводниках имеют очень низкую энергию Ферми  $E_F \approx 4,8 \times 10^{-3}$  эВ. Поэтому электроны в этих квантовых ямах образуют вырожденный электронный газ только при очень низких температурах  $T < T_F = 57$  К. Для графена при  $n = 10^{12}$  см $^{-2}$  энергия Ферми  $E_F = 0,11$  эВ, и электронный газ остается вырожденным для  $T < 1335$  К. За счет гигантской мобильности носителей заряда электроны (или дырки) в графене могут иметь значительно большую скорость дрейфа ( $\sim 10^6$  м/с), когда сила фрикционного увлечения становится значительно больше и начинает доминировать вклад от квантовых флуктуаций.

**Рисунки 2а и 2б цветной вкладки** показывают зависимости силы фрикционного увлечения от скорости дрейфа носителей заряда при  $d=1$  нм (а) и  $d=10$  нм (б). Вклады от тепловых и квантовых флуктуаций показаны раздельно. При  $v < 10^5$  м/с сила трения сильно зависит от температуры, т.е. она определяется тепловыми флуктуациями. Однако для  $v > 10^6$  м/с начинает доминировать вклад от квантовых флуктуаций. Сильное усиление трения возникает в случае резонансного туннелирования фотонов. Как обсуждалось выше, резонансное туннелирование фотонов возникает при  $v > 2v_F \approx 2 \cdot 10^6$  м/с. При таких скоростях и при  $d=1$  нм квантовое трение доминирует над тепловым трением даже при комнатной температуре при  $d=10$  нм квантовое трение доминирует при низких температурах.

Недавно мы показали, что квантовое трение можно детектировать путем измерения вольт-амперных характеристик графенового полевого транзистора. Электроны, перемещающиеся в графене под действием электрического поля, будут испытывать внутреннее трение за счет взаимодействия с акустическими и оптическими фононами в графене и внешнее трение за счет взаимодействия с оптическими фононами в расположенной поблизости подложке из SiO $_2$ . В сильных электрических полях электроны двигаются с большими скоростями, при этом основной вклад в трение дает взаимодействие с оптическими фононами в графене и в SiO $_2$ . Однако частота оптических фононов в графене приблизительно в четыре раза больше их частоты в SiO $_2$ . Поэтому основной вклад в трение будет давать взаимодействие с оптическими фононами в SiO $_2$ ; соответственно, этим же взаимодействием определяется электропроводность графена в сильных электрических полях.

**Рис.3а цветной вкладки** показывает зависимость плотности тока  $J$  от напряженности электрического поля  $E$  для концентрации носителей заряда  $n=10^{12}$  см $^{-2}$  при различных температурах. Ток насыщения  $J_{\text{sat}} \approx 1,6$  мА/мкм и скорость, при которой наступает насыщение,  $v_{\text{sat}} \approx 106$  м/с. Ток насыщения слабо зависит от температуры, что указывает на то, что в основном он определяется квантовыми флуктуациями. На **рис.3б цветной вкладки** вклады в силу трения от квантовых и тепловых флуктуаций показаны раздельно. Усиление трения при резонансном туннелировании фотонов возникает при

условии (см. вышеприведенное обсуждение)  $vq_x = \omega_{ch} + \omega_0$ , где  $\omega_0 \approx 60$  мэВ ( $9 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ ) – частота поверхностных фононных поляритонов для  $\text{SiO}_2$ . При малых расстояниях между графеном и подложкой характерное значение волнового вектора определяется волновым вектором Ферми  $k_F \approx 10^8 \text{ м}^{-1}$ . Таким образом, сила трения сильно возрастает при резонансном туннелировании фотонов, когда  $v > v_{\text{sat}} = \omega_0/k_F + v_F \sim 2 \cdot 10^6 \text{ м/с}$

## Забегая вперед

Силы Казимира и квантовое трение, как сверхпроводимость и сверхтекучесть, – макроскопические явления, природа которых определяется квантовыми закономерностями. Идея о квантовых флуктуациях электромагнитного поля нашла применение в самых разнообразных областях физики. Например, с помощью ее был объяснен лэмбовский сдвиг атомного спектра и аномальный магнитный момент электрона.

Квантовые колебания электромагнитного поля обусловлены виртуальными фотонами – частицами, которые непрерывно рождаются и исчезают в вакууме. С помощью металлического зеркала, движущегося ускоренно с околосветовой скоростью, виртуальные фотоны можно превратить в реальные фотоны, что приводит к излучению движущимся с ускорением зеркалом. В этом состоит динамический эффект Казимира. Недавно динамический эффект Казимира наблюдался в сверхпроводящем волноводе<sup>9</sup>. Существует очевидное сходство между излучением, которое возникает при динамическом эффекте Казимира, и излучением Хогинга, которое ответственно за квантовое испарение черных дыр.

Кроме фундаментального, квантовые флуктуации имеют также большое прикладное значение. В настоящее время ведется активная работа по созданию наноэлектромеханических систем (НЭМС), которые могут найти свое применение в таких областях науки и техники, как зондирование, телекоммуникации, обработка сигналов, хранения информации и др. По этой причине интерес к силам Казимира возрос, так как они определяют взаимодействие между наноструктурами и ответственны за адгезию между движущимися частями в наноэлектромеханических системах.

Для практических применений важно научиться управлять силами Казимира. Из теории Лифшица следует, что если два тела поместить в жидкость, то при подходящем выборе материала тел притяжение между телами может смениться на отталкивание. В случае отталкивания силы Казимира-Лифшица могут позволить квантовую левитацию объектов в жидкости и привести к новому классу настраиваемых наномасштабных устройств с ультранизким статическим трением.

Квантовое трение определяет предел, до которого может быть уменьшена сила трения, а следовательно, и флуктуации, так как, согласно установленному Эйнштейном соотношению, трение и флуктуации связаны друг с другом. С другой стороны, флуктуации влияют на точность измерения сил. Возможно, наиболее волнующее приложение этих идей связано с механическим детектированием ядерного спинового резонанса. К примеру, детектирование одиночного спина с помощью магниторезонансной сило-

вой микроскопии (которая была предложена для получения изображения биологических объектов, таких как протеины с атомарным разрешением) и для квантового компьютера потребует уменьшения флуктуирующих сил (и, следовательно, трения) до беспрецедентного уровня.

Десять лет тому назад силы и трение Казимира были академической любопытностью. Сегодня – это технологическая проблема: если наномеханическим устройствам предвещают такое широкое применение в различных областях науки и техники, то нужно научиться контролировать силы, господствующие в наном мире. Квантовая механика стремительно становится квантовой инженерией.

### Литература:

1. *Casimir H.B.G.* Proc. K. Ned. Akad. Wet. 51, 793 (1948).
2. *Lifshitz E.M.* Zh. Eksp. Teor. Fiz. 29, 94 (1955) [Sov. Phys. JETP 2,73 (1956)]
3. *Sushkov A.O., Kim W.J., Dalvit D.A.R., Lamoreaux S.K.* Nature Phys. 7, 230 (2011).
4. *Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A.* Science 306, 666 (2004).
5. *Volokitin A.I., Persson B.N.J.* Rev.Mod.Phys. 79, 1291 (2007).
6. *Kim S., Nah I. Jo, J., Yao Z., Banerjee S.K., Tutuc E.* Phys. Rev.B 83, 161401 (2011)
7. *Gorbachev R.V., Geim A.K., Katsnelson M.I., Novoselov K.S., Tudorovskiy T., Grigorieva I.V., MacDonald A.H., Watanabe K., Taniguchi T., Ponamarenko L.A.* Nature Phys. 8, 896 (2012)
8. *Volokitin A.I., Persson B.N.J.* Phys. Rev. Lett. 106, 0945 02 (2011).
9. *Wilson C.M., Johansson I., Pourkabirian A., Simoen M., Johansson J.R., Duty T., Nori F., Delsing P.* Nature 479, 376 (2011)

# Реликтовое излучение: читаем код Вселенной

О.В. Верходанов

**Олег Васильевич Верходанов**

*доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН*

*Профессор Новосибирского государственного университета*

*Проект РФФИ № 13-02-11503*

## Введение

Революционные результаты в наблюдательной космологии последних 20 лет изменили картину Мира и выдвинули космологию на первый план современной физики. Два из них удостоены Нобелевских премий по физике за 2006 и 2011 гг.: 1) открытие ускоренного расширения Вселенной, связанного с загадочной темной энергией, и 2) открытие флуктуаций реликтового излучения (РИ), которое подтвердило наши представления о формировании крупномасштабной структуры Вселенной, появлении звезд и галактик, а значит, и нас с вами. В эти же годы был измерен химический состав Вселенной и проведено картографирование распределения темной материи. И наконец, пожалуй, к самым важным экспериментам последнего времени нужно отнести построение детальной карты РИ, проведенное в двух космических экспериментах (миссиях): WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) космического агентства США NASA и Planck Европейского космического агентства (ESA). Именно с момента опубликования результатов первого года работы миссии WMAP в 2003 г. началась эпоха точной космологии. Теперь астрономы и физики не обсуждают, какая модель

Вселенной лучшим образом описывает окружающий мир, а точнейшим образом измеряют ее параметры (в пределах лучше 10%). Каким образом это делается, мы и расскажем в этом небольшом обзоре.

Начнем с истории. В 1922 г. Александр Фридман на основе решения уравнения Эйнштейна теоретически предсказал расширение Вселенной. В 1929 г. Эдвин Хаббл подтвердил факт расширения в результате наблюдений удаляющихся от нас галактик. Оба события стали ключевыми в формировании нового мировоззрения и доказательством адекватности описания Мира физикой. В 1948 г. Ральф Альфер и Роберт Герман, ученики Георгия Гамова, на основе созданной ими первой теории горячего Большого взрыва предсказали физические свойства Фридмановской Вселенной. Они провели расчет первичного нуклеосинтеза, который объяснил наблюдаемое содержание водорода (~ 75%) и гелия (~ 25%) в настоящую эпоху, а также показали, что должен существовать реликтовый фон с температурой 5 градусов Кельвина. В полученном решении физическая картина Мира описывается небольшим числом параметров. Такое описание дает возможность как предсказывать физические свойства Вселенной, так и решать обратную задачу – измерять космологические параметры по наблюдательным данным. Как выяснилось позднее, теорию можно было проверить непосредственно еще во время создания, используя наблюдательные данные. В 1941 г. МакКеллар при изучении линий поглощения молекулы циана (CN) в направлении на звезду  $\epsilon$  Змееносца обнаружил, что молекула имеет дополнительное возбуждение, соответствующее температуре 2,3 К. Этот факт удалось объяснить позднее, когда И.С.Шкловский, а также Дж. Филд и Р. Тадеуш показали, что возбуждение CN вызвано фотонами космического микроволнового фона. Шкловский назвал этот фон реликтовым излучением.

В 1955 г. Т.А.Шмаонов, проводя наблюдения под руководством С.Э.Хайкина на рупорной антенне в Пулковской обсерватории, измерил распределение температуры фонового излучения на волне 3,2 см. Он получил значение температуры, равное  $4 \pm 3$  К, не зависящее от зенитного расстояния. Хотя точность измерения была невелика, эта температура оказалась на 2 К выше возможной эффективной температуры тропосферы. Результаты измерения вошли в кандидатскую диссертацию Шмаонова, но особого внимания со стороны астрофизики в то время они не получили.

В 1964 г. А.Г. Дорошкевич и И.Д. Новиков в предположении правильности теории горячей Вселенной рассчитали спектр электромагнитного излучения неба с учетом эволюции галактик, красного смещения и ожидаемой температуры реликтового фона и показали наличие наблюдательного окна в спектре, где температура чернотельного микроволнового фона выше мешающих компонент. Также они указали тип рупорной антенны, на которой можно его наблюдать. Статья «Средняя плотность излучения в Метагалактике и некоторые вопросы релятивистской космологии» вышла в журнале «Доклады АН СССР» [1] и в том же году – в английском переводе, но осталась незамеченной.

В этом же году американские исследователи «Бэлл Лабс» Арно Пензиас и Роберт Вильсон изучали радиоотклик от аэростатов с помощью сверхчувствительной 6-метровой рупорной антенны с приемником, охлаждаемым жидким гелием. Борясь с шумами, исследователи обнаружили необъяснимое

превышение шумового фона, равное 3,5 К, о чем и доложили на семинаре у Бернарда Берка в MIT. Ранее на этом же семинаре был сделан доклад группой Р. Дике и Дж. Пиблса о возможной температуре микроволнового фонового излучения. Благодаря такому удачному стечению обстоятельств стало понятно, что сделанное случайное открытие шумового сигнала может быть объяснено в рамках космологической модели горячей Вселенной. Необходимо подчеркнуть, что, несмотря на случайность открытия реликтового излучения, к тому времени теория предсказала существование РИ и указала на возможность его наблюдения. Открытие реликтового излучения было отмечено Нобелевской премией по физике 1978 г. В своей нобелевской лекции Пензиас рассказал и о работе советских астрофизиков А. Дорошкевича и И. Новикова, которая вышла раньше, чем было сделано открытие РИ.

Подтверждение теории горячей ранней Вселенной (теории Большого Взрыва) и наличие структур в окружающем мире естественным образом приводили к постановке задач следующего уровня: доказательству чернотельности микроволнового фона и поиску анизотропии (искажений или флуктуаций) реликтового излучения, существование которой следовало из предсказания А.Д. Сахарова в 1965 г. о колебаниях плотности материи в раннюю эпоху Вселенной. Позднее эти колебания названы Сахаровскими осцилляциями. Десятки экспериментов (*см. список в [2]*) в широком диапазоне длин волн от 408 МГц до 300 ГГц с середины 60-х гг. прошлого века по настоящее время позволили установить температуру РИ с высокой точностью ( $T_0 = 2,7356 \pm 0,038$  К) и подтвердить чернотельность этого излучения.

Поиск и обнаружение флуктуаций температуры РИ приводили к понижению верхней границы их существования от  $10^{-3}$  до  $10^{-5}$  (в относительных единицах  $\Delta T/T$ ) на различных угловых масштабах. Это, в свою очередь, заставляло менять теорию формирования крупномасштабной структуры и предсказывать новые наблюдательные эффекты. Лидером в этом теоретическом поиске была группа Я.Б.Зельдовича. Важные эксперименты были проведены на радиотелескопе РАТАН-600 группой Ю.Н.Парийского в 70-е гг. прошлого века. Они понизили верхнюю границу относительного уровня флуктуаций температуры фона на угловых масштабах 5-10 мин дуги до  $10^{-5}$ . Следует упомянуть и космический советский эксперимент Реликт-1, давший намек на существование неоднородности на небе на низких гармониках. Открытие флуктуаций и построение их карты было сделано космической миссией NASA COBE (*Cosmic Background Explorer* – исследователь космического фона). В результате работы COBE с высокой точностью ( $\Delta T/T \sim 10^{-5}$ ) было подтверждено существование анизотропии [3] и представлена ее карта на полной небесной сфере. За определение чернотельности спектра излучения реликтового излучения и построение карты анизотропии его температуры Джон Матер и Джорж Смут были награждены Нобелевской премией в 2006 г.

Измерение космологических параметров, проведенное последующей миссией NASA WMAP, и уточнение их значений в миссии ESA Planck в результате наблюдения реликтового излучения стало фундаментальным вкладом в космофизику и зафиксировало современную стандартную космологическую модель с недостижимой ранее точностью.

Как можно получить информацию из данных наблюдений космического микроволнового фона, рассказывается в этой статье.

## Возникновение флуктуаций реликтового фона

В современной модели эволюции Вселенной выделяют несколько этапов, в течение которых ее физические свойства кардинально различаются. Очень ранняя Вселенная (Большой Взрыв) включает Планковскую эпоху с температурой примерно  $10^{32}$  К и плотностью около  $10^{93}$  г/см<sup>3</sup> до  $10^{-37}$  сек от зарождения Вселенной; эпоху быстрого (экспоненциального) раздувания Вселенной за первые  $10^{-35}$  сек, называемого космической инфляцией; эпоху нарушения соотношения между материей и антиматерией ( $10^{-11}$  сек,  $10^{16}$  К). Ранняя Вселенная включает эпоху разделения взаимодействий ( $10^{-6}$  сек,  $10^{13}$  К); охлаждение кварк-глюонной плазмы и появление протонов и нейтронов; аннигиляцию частиц и античастиц (10 сек после Большого Взрыва) и эпоху доминирования излучения, когда в энергетическом балансе Вселенной преобладали фотоны, возникшие после аннигиляции антиматерии и активно взаимодействующие с заряженными частицами в первичной плазме. К этому же этапу относится эпоха первичного нуклеосинтеза: рождение ядер дейтерия и гелия из свободных нейтронов и протонов при охлаждении температуры до  $10^{10}$  К через 200 сек после Большого Взрыва. Спустя 70 тыс. лет, когда плотности излучения и материи сравнялись, из квантовых неоднородностей, возникших еще во время космической инфляции, за счет гравитации и давления начали образовываться первые структуры в молодой Вселенной. Эволюция таких структур, процесс формирования которых и был предсказан А.Д. Сахаровым, описывается физикой акустических волн в плазме. Свойства первичной плазмы, определяемой всеми компонентами плотности энергии, а также другими физическими параметрами, такими, например, как скорость расширения Вселенной или количество энергии в волнах разной длины, оказываются связаны с излучением, оставшимся от аннигиляции материи и антиматерии. Возникшие неоднородности в распределении материи в эту эпоху не являются стабильными: часть из них разрушается, а часть «выживает», причем из «выживших» выделяются структуры определенного размера, расположенные в пространстве так, как это происходит в стоячих волнах: где-то наблюдаются пики, а где-то ямы. Согласно современным представлениям, при образовании флуктуаций плотности материи в этот период основным гравитирующим компонентом является холодная темная материя. Фотоны (излучение) «чувствуют» эти флуктуации плотности, изменяя свою энергию соответственно. Спустя 380 тыс. лет после Большого Взрыва расширение Вселенной привело к понижению температуры до 3000 К. В результате стало возможным существование стабильных, не разрушаемых излучением, атомов водорода. Это период называется эпохой рекомбинации водорода. Излучение свободно проходило сквозь вещество, сохраняя в своем распределении информацию о свойствах первичных возмущений плотности. Процесс рекомбинации приходится на период доминирования материи (так называемая *пылевидная стадия расширения*), продолжавшийся ~ 7 млрд лет до эпохи ускоренного расширения Вселенной (*стадия доминирования темной энергии*), начавшейся 6,5 млрд лет назад и время окончания

которой неизвестно. Во время пылевой стадии выделяются темная эпоха (от 380 тыс. лет до  $\sim 200$ –400 млн лет после Большого Взрыва), когда не существовали крупные структуры, которые можно было бы сейчас наблюдать, и эпоха реионизации (от 400 млн до 1 млрд лет), во время которой ультрафиолетовое излучение первых звезд и ядер галактик ионизовало нейтральный водород межгалактической среды. На стадии реионизации также образуются галактики и их системы. Эти процессы отражаются и в фоновом излучении из-за взаимодействия фотонов со вторично ионизованным веществом и из-за изменения энергии фотонов в переменном гравитационном потенциале (так называемый интегральный эффект Сакса-Вольфа), когда формируются скопления галактик и пустоты между ними. На стадии доминирования темной энергии (наша эпоха) скопления галактик оставляют свои отпечатки в распределении микроволнового фона за счет передачи энергии от быстрых электронов скопления фотонам (обратный эффект Комптона). Для межгалактического газа в скоплениях галактик эффект был теоретически рассчитан Я.Б.Зельдовичем и Р.А.Сюняевым еще в 1969 г. на основании уравнения А.С. Компанейца (1957) и многократно подтвержден в наблюдениях на ряде телескопов миллиметрового диапазона, в том числе (и в первую очередь) в миссии Planck и на Атакамском космологическом телескопе.

Флуктуации температуры реликтового излучения зарегистрированы на уровне  $\Delta T/T \sim 10^{-5}$ . В распределении реликтового излучения наблюдается также и дипольная компонента, в виде уярчения фона в направлении движения Земли и ослабления в противоположном направлении на уровне  $\Delta T/T \sim 10^{-3}$ . Эта анизотропия возникает из-за движения местного скопления галактик (вместе с нашей Галактикой, Солнцем и Землей).

Таким образом, различные физические условия, существовавшие в разные эпохи эволюции Вселенной, привели к искажениям реликтового фона, которые мы сейчас наблюдаем на различных угловых масштабах. Угловые масштабы на небесной сфере задаются числом (называемым мультиполь  $l$ ), обратно пропорциональным угловому расстоянию  $\omega$ . Т.е. чем больше  $l$ , тем меньшему  $\omega$  он соответствует. Если мы представим влияние различных физических процессов, приводящих к возникновению флуктуаций фона, в виде функции, то ее можно определить как зависимость энергии, приходящей с неба, от заданного углового масштаба. Такую зависимость называют угловым спектром мощности и обозначают  $C_l$ . С учетом условий формирования искажений фона, можно сказать, что  $C_l$  является функцией космологических параметров:  $C_l = C_l(\Omega_b, \Omega_{\text{CDM}}, \Omega_\Delta, H_0, \dots)$ , где  $\Omega_b$  – плотность видимой (барионной) материи по отношению к критической плотности,  $\Omega_{\text{CDM}}$  – относительная плотность холодной темной материи,  $\Omega_\Delta$  – относительная плотность темной энергии,  $H_0$  – постоянная расширения Хаббла, имеется еще и ряд других параметров.

## Наблюдение реликтового излучения

Понимание того факта, что реликтовый фон несет уникальную информацию, позволяющую восстановить все основные космологические параметры с точностью, практически недостижимой в других экспериментах, мотиви-

ровало мировое астрономическое сообщество на строительство специализированных радиотелескопов. Сотни инструментов были профинансированы научными фондами разных стран в конце прошлого и начале этого века.

Спектр мощности фона был измерен на различных угловых масштабах в разных направлениях небесной сферы. В данной работе мы остановимся на двух самых масштабных космических эксперимента WMAP и Planck (*рис. 1 цветной вкладки*).

### **Космическая миссия WMAP**

Спутник NASA WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (*рис. 1 цветной вкладки*)) – зонд им. Уилкинсона для исследования микроволновой анизотропии) завершил свою работу в 2011 г. после 9 лет наблюдений. Его значимость заключена не только в уровне решаемых задач, включающих определение геометрии, состава и особенностей эволюции Вселенной по картам анизотропии РИ с 13-мин угловым разрешением, но в качестве анализа данных. Прогрессивное мышление команды WMAP проявилось еще и в немедленном предоставлении архива наблюдений, промежуточных и результирующих карт анизотропии температуры и поляризации в общее пользование мирового научного сообщества. Выбор орбиты миссии, стратегии сканирования неба и дизайна спутника был ориентирован на получение 1) независимого (некоррелированного) пиксельного шума, 2) минимизации систематических ошибок, аккуратной калибровки и 3) проведение многочастотных наблюдений. Орбита миссии WMAP выбрана так, чтобы положение спутника сохранялось стабильным, а излучение Солнца было экранировано. Этим целям удовлетворяет квазиустойчивая точка Лагранжа L2 в гравитационной системе Солнце-Земля. Точка L2 находится в 1,5 млн км от Земли в направлении от Солнца и обращается вокруг Солнца вместе с Землей (*рис. 2 цветной вкладки*).

Спутник WMAP обращался вокруг точки L2 с направленной от Солнца антенной и проводил сканирование неба, измеряя три моды поляризации (параметры Стокса I, Q, U) в пяти частотных полосах: 23, 33, 41, 61, и 94 ГГц. Важнейшие результаты WMAP – карта анизотропии с разрешением  $l < 100$  (*рис. 3 цветной вкладки*), угловой спектр мощности РИ с  $1 < l < 600$  для анизотропии температуры и поляризации, таблица всех основных космологических параметров, определенных независимо от остальных экспериментов [4]. Отметим также первое построение карт неба с относительно высоким разрешением для поляризации и расчет поляризационных спектров, позволивших, в частности, установить эпоху вторичной ионизации (реионизации), т.е. время образования первых звезд.

### **Миссия Planck**

Миссия Planck Европейского Космического Агентства при участии NASA (через JPL), стартовавшая в мае 2009 г. и заканчивающаяся в сентябре 2013 г., предназначена для исследования анизотропии температуры и поляризации РИ в широком диапазоне длин волн (от мм до далекого ИК диапазона) с очень высокими точностью и чувствительностью. Первоначально миссия называлась COBRAS/SAMBA. После улучшения проекта в 1996 г. была переименована в Planck в честь немецкого физика Макса Планка. Измерения прово-

дятся из точки Лагранжа L2, также как и в миссии WMAP. Запланированная продолжительность миссии чуть больше 2,5 лет. В конструкции спутника смонтированы два внеосевых параболических зеркала: первичное имеет размер 1,9x1,5 м и вторичное –1,1x1,0 м. На зонде (рис. 1) работают два инструмента: низкочастотный (*Low Frequency Instrument – LFI*) с полосами на 30, 44, 70 ГГц и высокочастотный (*High Frequency Instrument – HFI*) с полосами на 100, 143, 217, 353, 545, 857 ГГц. Planck имеет преимущества перед WMAP по ряду параметров: 1) лучшее разрешение в карте (в 3 раза) и соответственно в угловом спектре мощности, 2) более высокая чувствительность (в 10 раз), 3) 9 частотных полос, которые позволяют улучшить модель фоновых компонент. По результатам первого релиза данных в марте 2013 г. научная команда представила карту реликтового излучения с разрешением до 3 мин. дуги и угловой спектр мощности, позволивший уточнить космологические параметры [5] и подтвердивший стандартную космологическую модель Вселенной.

Рассмотрим подробнее, как получить эти результаты из наблюдательных данных.

## Анализ данных

Исследование карт микроволнового фона включает в себя три взаимосвязанных и в настоящее время неразделимых направления: теорию, наблюдения и моделирование. Исключив одно из них, можно потерять смысл в других. Теория строится по наблюдениям и дает возможность промоделировать наблюдательные эффекты при измерении флуктуаций фона. А модели, в свою очередь, позволяют учесть систематику в наблюдательных данных и

Технологическая цепочка анализа данных РИ может быть условно разделена на несколько этапов:

- 1) регистрация данных как зависимости измеряемой температуры от времени наблюдения или небесных координат:  $T(t)$ ;
- 2) построение карты, включающее восстановление сигнала на сфере из временных рядов и осреднение данных в пикселях (процедура пикселизации);
- 3) разделение компонент микроволнового фона: выделение реликтового излучения, компонент галактического фона, а также внегалактических источников;
- 4) анализ статистики сигнала на карте;
- 5) анализ спектра мощности и определение космологических параметров.

Как правило, каждый этап включает в себя тысячи моделирований эксперимента для выполняемых процедур.

Знакомство с анализом данных РИ начинается с понятий мультиполя и пикселизации. Введем несколько терминов, облегчающих понимание описываемых процедур. Для исследования излучения на различных угловых масштабах карту на небесной сфере раскладывают на так называемые сферические гармоники или мультиполи. Сферические гармоники можно представить в виде комбинации двумерных синусов и косинусов на сфере (*см. рис. 4, 5 и 6 цветной вкладки*). Обычно это записывается в виде суммы таким образом:

$$\Delta T(\theta, \phi) = \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=-l}^{m=l} a_{lm} Y_{l,m}(\theta, \phi).$$

Здесь  $\Delta T(\theta, \phi)$  обозначает флуктуации температуры реликтового фонового излучения в зависимости от полярного угла  $\theta$  и долготы  $\phi$ ,  $Y_{lm}(\theta, \phi)$  – специальные сферические функции (гармоники), вычисляемые для разных угловых масштабов и стандартного расположения пятен,  $a_{lm}$  – коэффициенты, отображающие вклад сферических гармоник,  $l$  – номер сферической гармоники или мультиполя, соответствующий размеру пятен (как аргумент в синусе),  $m$  – номер моды мультиполя  $l$ , показывающей способ, которым пятна данного размера располагаются на сфере.

Обычно при анализе используются только мультиполи, в которых есть космологическая информация, т.е.  $l > 1$ . Напомним, что монополь ( $l=0$ ) показывает среднюю температуру фона, а диполь ( $l=1$ ) – направление суммарного вектора движения Земли. Разложение приходящего сигнала на небе по сферическим гармоникам является ортогональным, что отличает его от обычной аппроксимации полиномами: если мы, например, вычитаем из карты определенную гармонику, соответствующую выбранному угловому размеру, то сигнал на других масштабах сохраняется без изменения. Примеры разложения по низким мультиполям показаны на **(рис.4 цветной вкладки)**. (квадруполь  $l=2$ ) и 5 (октуполь  $l=3$ ). На **рис.5 цветной вкладки** показаны карты низких мультиполей ( $1 < l < 11$ ).

### Пикселизация

Записанные ряды измерений температуры еще не являются картой микроволнового фона. Для того чтобы построить карту фона, необходимо разобраться, какой исходный сигнал привел к зарегистрированному отклику с учетом многократного прохождения луча телескопа через данную площадку неба, а также учесть влияние шумов регистрирующей аппаратуры. Эта задача записывается в виде системы линейных уравнений, учитывающих правило разбиения сферы на площадки (пикселизацию), свойства радиантенны (так называемую диаграмму направленности антенны – телесный угол, в котором антенна может принимать радиосигнал), свойства случайного шума. После накопления многократных наблюдений излучения в выбранных площадках для заданной пикселизации неба создается карта принимаемого сигнала. Выбор пикселизации является чисто математической задачей разбиения сферы на площадки. Отметим, что постановка такой задачи отсылает нас к античности – к изучению возможности построения правильных многогранников.

Проблема пикселизации сферы в современном представлении в задачах исследования протяженного излучения прежде всего связана с точностью регистрации и анализа данных на сфере. В таком виде задача обсуждалась еще в 70-е гг. прошлого века советскими математиками С.Л.Соболевым, И.П.Мысовских и С.И.Коняевым. Проблема стала актуальной в астрофизике с появлением полных обзоров неба и необходимостью разложения по сферическим гармоникам протяженного сигнала. К вопросу пикселизации вернулись в эксперименте по изучению РИ миссии COBE, а также в метеоро-

логических исследованиях. В настоящее время при анализе РИ применяют две сетки пикселизации, для которых существует сервисное программное обеспечение: HEALPix и GLESP.

### HEALPix

HEALPix (Hierarchical Equal Area isoLatitude Pixelisation) – иерархическая сетка пикселизации с равными площадями и положениями пикселей одного на одной широте [6]. Авторы определили основные требования к математической структуре дискретной сетки на полном небе и объединили их в трех пунктах: 1) *Иерархическая структура базы данных*. Это требование обусловлено задачами выбора данных (пикселей) из прилежащего пространства для формирования древовидной структуры базы данных, что, в свою очередь, облегчает применение различных топологических методов при анализе и позволяет легко конструировать вейвлет-преобразования на треугольных и квадратных сетках с быстрым выбором соседних пикселей. 2) *Равные площади дискретных элементов разбиения* упрощают работу с шумовыми характеристиками, связанными с размером пиксела. 3) *Распределение пикселей одного ряда на сфере вдоль одной широты*. Это свойство существенно для получения высокой скорости вычислений во всех операциях выполнения расчетов сферических гармоник. Отклонение узлов сетки от одной широты приводит к большим потерям времени с ростом числа обрабатываемых точек.

Базовое разрешение в HEALPix задается двенадцатью пикселями (или гранями) на трех кольцах вокруг полюсов и экватора. Следующий уровень иерархии формируется из предыдущего разбиением каждого пиксела предыдущего уровня на четыре равных пиксела.

### GLESP

В 2003 г. мы предложили схему пикселизации, ориентированную прежде всего на гармонический анализ [7,8]. В этом случае первостепенное значение уделено точности вычисления при разложении на сферические гармоники, в которых требуются расчеты интегралов. Для точного вычисления интеграла удобно использовать метод Гауссовых квадратур, предложенный Гауссом в 1814 г. и развитый Кристоффелем в 1877 г.: по определенному правилу выбираются узлы (точки), в которых можно проводить вычисления, и веса, с которыми результаты расчета войдут в общую сумму. Метод квадратур дает точное значение интеграла, несмотря на дискретность вычислений. Мы применили этот способ для узлов, определяемых нулевыми значениями полиномов Лежандра, и построили сетку пикселизации, в основании которой лежат кольца на сфере, проходящие через эти узлы. Каждое кольцо (за исключением околполюсных) разбивается на трапецеидальные пиксели, близкие или равные по площади. Такой подход мы назвали пикселизацией по методу Гаусса-Лежандра GLESP (*Gauss-Legendre Sky Pixelization*) – т.е. разбиением неба по кольцам, проходящим через узлы в нулях полиномов Лежандра для интегрирования по методу Гаусса.

Итак, при анализе данных РИ на сфере сейчас используются две схемы пикселизации, для которых существует развитое программное обеспечение: иерархическая схема HEALPix, ориентированная на пиксельные вычисления, и неиерархическая схема GLESP, реализованная для гармониче-

ских вычислений. Пример заполнения пикселями сферы для обеих схем показан на *рис. 7 цветной вкладки*.

### Разделение компонент

Следующий этап после построения карты – выделение собственно сигнала реликтового фона. Измеряемый в эксперименте сигнал содержит, помимо РИ, вклады галактических фоновых компонент и галактических и внегалактических радиоисточников, что можно условно расписать как

*Сигнал = (РИ + синхротрон + пыль + свободно-свободное + источники) \* ДН + Шум, где символ "\*" обозначает особую математическую процедуру – операцию свертки, описывающую интегрирование под скользящим пересечением двух функций; ДН – диаграмма направленности антенны радиотелескопа.*

При построении алгоритмов выделения реликтового фона из многочастотных данных, используют два свойства РИ: 1) независимость от частоты (признак излучения абсолютного черного тела), что отличает его от других фоновых компонент и 2) отсутствие корреляции со всеми фоновыми излучениями, так как РИ – случайный процесс. С учетом этих свойств и многочастотных наблюдений можно восстановить распределение сигнала на всей небесной сфере. Один из методов построения полной карты анизотропии температуры РИ представляет собой комбинацию наблюдательных данных на разных частотах с умножением на некоторые коэффициенты, которые позволяют в результате удалить галактический сигнал и тем самым выделить микроволновый реликтовый фон. Так как комбинация каналов в этом подходе применяется без привлечения наблюдений в других экспериментах, метод называется «внутренней линейной комбинацией» (ILC – *Internal Linear Combination*), и полученная этим способом карта соответственно называется картой ILC. Такая процедура применялась и в миссии WMAP, и в миссии Planck. Самые яркие области в нашей Галактике, а также внегалактические источники можно учесть, накладывая маски, то есть, исключая из рассмотрения определенные участки небесной сферы.

Все разделенные компоненты микроволнового излучения, полученные в космических миссиях, доступны научному сообществу на сайтах публичных архивов NASA и ESA.

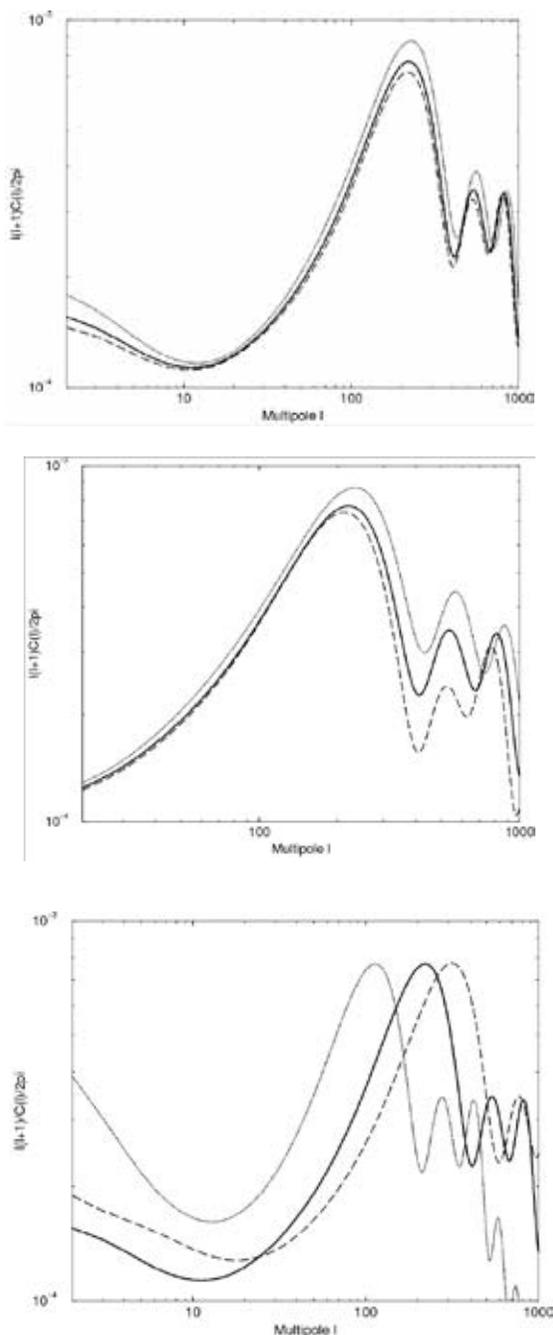
### Спектр мощности флуктуаций

Итак, мы получили очищенный от фона сигнал реликтового излучения. Следующим шагом будет построение углового спектра мощности  $C_l$ . Значимость этого спектра уже обсуждалась во втором разделе. Для расчета спектра мощности мы должны опять обратиться к формуле разложения карты на сферические гармоники 1). Спектр мощности реликтового фона определяется взвешенной суммой квадратов амплитуд гармоник, заданных коэффициентами  $a_{lm}$  и вычисляется так:

$$C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^l |a_{lm}|^2.$$

Необходимо также сказать, что мы наблюдаем  $C_l$  на нашем небе. Если поместить наблюдателя в другую точку нашей Вселенной,  $C_l$  будет слегка отли-

чаться. Настоящий спектр  $C_l$  можно оценить, осреднив данные всех наблюдателей, что аналогично осреднению по ансамблю допустимых Вселенных. Присутствие шума в наблюдательных данных также не дает возможности получить истинные значения коэффициентов  $a_{lm}$  при разложении по мульт-



**Рис. 1.** Пример расчетов углового спектра мощности  $l(l+1)Cl/2\pi$  реликтового излучения в зависимости от разных космологических параметров. Жирной линией показан спектр мощности в стандартной модели  $\Lambda$ CDM ( $\Omega_{CDM}=0,26$ ,  $H_0=68$  км/с Мпк,  $\Omega_K=0$ ). Слева: зависимость от вариации параметра плотности темной материи  $\Omega_{CDM}$ . Пунктирной линией показан спектр с  $\Omega_{CDM}=0,17$ , штриховой – с  $CDM=0,27$ .

В центре: зависимость от вариации постоянной Хаббла. Пунктирной линией показан спектр с  $H_0=60$  км/с/Мпк, штриховой – с  $H_0=85$  км/с/Мпк. Справа: зависимость от вариации параметра кривизны. Пунктирной линией показан спектр с  $\Omega_K=-0,3$ , штриховой – с  $K=0,3$ . Для расчетов использовалась процедура CAMB [12].

типолям. Но даже если бы у нас имелись идеальные данные, то для низких мультиполей  $l$  мы могли бы измерить только  $2l+1$  мод. Это приводит к внутренним неувязкам (разбросу значений) при определении спектра, называемым космической (лучше сказать, космологической) вариацией. Напомним, что форма спектра мощности обусловлена влиянием большого набора процессов на ранних этапах эволюции Вселенной, генерирующих анизотропию реликтового излучения в период рекомбинации водорода и связанных с возмущениями плотности, скорости и метрики, эволюционирующих в режиме звуковых волн (см. подробнее об этих и других эффектах первичной и вторичной анизотропии в монографиях [2,9,10]. Амплитуда возмущений реликтового излучения после рекомбинации модулируется акустическими модами на фазе до рекомбинации в точном соответствии с предсказанными А.Д.Сахаровым [11] эффектом барионных осцилляций, связанных со звуковыми волнами в плазме. Характеристикой анизотропии РИ, обусловленной Сахаровскими осцилляциями, и является спектр мощности флуктуаций в пространстве мультиполей. Таким образом, условия формирования флуктуаций СМВ, а, следовательно, и описывающие их космологические параметры, «впечатаны» в спектр мощности этого излучения и фактически определили современное состояние Вселенной.

Теперь, когда мы знаем физические механизмы формирования углового спектра мощности и можем его рассчитать, исходя из космологических параметров, а также знаем, как он выглядит для реальных наблюдательных данных, можно решить и обратную задачу: по спектру мощности определить космологические параметры. Решение этой задачи сейчас автоматизировано и реализовано с помощью известной в космологии программы SAMB [12]. В качестве примера расчетов с помощью процедуры SAMB на рис. 1 показано поведение углового спектра мощности РИ в зависимости от вариации некоторых параметров.

Итак, мы очень кратко прошли весь путь: от наблюдений реликтового излучения до определения космологических параметров, т.е. описания того, как устроен наш Мир. И здесь естественным образом возникает еще один вопрос.

### Что дальше ?

При ответе на этот вопрос посмотрим на сравнительную таблицу космологических параметров, измеренных в миссиях WMAP и Planck

В *Таблице 1* приведены плотности энергетических компонентов Вселенной по отношению к критической плотности: темной энергии  $\Omega_\Lambda$ , барионной (светящейся) материи  $\Omega_b$  и холодной темной материи  $\Omega_{\text{CDM}}$ , а также постоянной расширения Хаббла (в настоящую эпоху)  $H_0$ , возраст Вселенной  $t_0$ , оптическая толща в эпоху реионизации  $\tau$ , показывающая прозрачность межзвездной среды в эпоху образования первых звезд, а также коэффициент  $\delta_8$ , описывающий плотность материи в кубе со стороной размером 8 Мпк. Из таблицы мы видим, что измеренные в двух независимых экспериментах параметры практически совпадают в пределах ошибок. Важным моментом является также и хорошее согласование с данными других экспериментов,

таких, например, как измерение распределения вещества в оптических обзорах неба и измерение светимости вспышек сверхновых. Все это позволяет нам сделать вывод о том, что космологическая модель установлена (это  $\Lambda_{\text{CDM}}$ ) и ее параметры известны с точностью выше чем 10%. Однако даже столь высокая точность позволяет рассматривать и расширения  $\Lambda_{\text{CDM}}$ -модели, например, с добавлением теплой темной материи, изменением числа типов нейтрино (до 4-х), вариацией со временем параметра темной энергии и другие. И в этом направлении нас еще ждут открытия.

Нельзя не сказать пару слов и о статистике распределения сигнала реликтового излучения. Как в данных WMAP, так и в данных Planck, в распределении фона имеются некоторые аномалии, к которым приковано внимание космологов: это и выравнивание квадруполья и октуполья вдоль одной

**Таблица 1**

Параметр / Миссия	Planck	WMAP	Разность
	0,693±0,019	0,721±0,025	-0,028
	0,0481	0,0463±0.0024	0,0018
	0,257	0,233±0,023	0,024
H0	67,9±1,5	70,0±2.2	-2,1
t0	13,796±0,058	3,74±0,11	56 млн лет
	0,089±0,032	0,089±0,014	0
	0,823±0,018	0,821±0,023	0,002

оси (см. *рис.4 и 5 цветной вкладки*), существование экстремально холодных пятен, несимметричность по мощности сигнала в северном и южном галактических и эклиптических полушариях и другие (см. также обзор [13]). Существование этих аномалий может привести нас к открытию новых эффектов в Солнечной системе, в Галактике или вообще в физике, а, может быть, просто помочь нам лучше понять самих себя.

Все только начинается.

### Литература:

1. Дорошкевич А.Г., Новиков И.Д., Доклады АН СССР 154, 809 (1964).
2. Насельский П.Д., Новиков Д.И., Новиков И.Д., Реликтовое излучение, М.: «Наука» (2003).
3. Smoot G.F. et al., ApJL 396, L1 (1992).

4. *Hinshaw G.F. et al.* ApJS, submitted (2013), arXiv:1212.5226.
5. *Planck Collaboration et al.* Astron. Astrophys., submitted (2013), arXiv:1303.5076.
6. *Gorski K.M., Hivon E., Banday A.J., Wandelt B.D. et al.* ApJ 262, 759 (2005).
7. *Doroshkevich A.G., Naselsky P.D., Verkhodanov O.V. et al.* Int.J.Mod.Phys.14, 275 (2003), astro-ph/0305537.
8. *Doroshkevich A.G., Verkhodanov O.V., Naselsky P.D. et al.* Int.J.Mod.Phys. 20, 1053 (2011), arXiv:0904.2517.
9. *Горбунов Д.С., Рубаков В.А.*, Введение в теорию ранней Вселенной: Космологические возмущения. Инфляционная теория. (М.:КРАСАНД, 2010).
10. *Лукаш В.Н., Михеева Е.В.*, Физическая космология. (М.:ФизМатЛит, 2010).
11. *Сахаров А.Д.*, ЖЭТФ 49, 345 (1965).
12. *Lewis A., Challinor A., Lasenby A.* ApJ 538, 473 (2000), astro-ph/9911177.
13. *Верходанов О.В.* УФН 182, 1177 (2012)

# Джозефсоновские переходы с ферромагнитным барьером для сверхпроводниковой электроники.

В.В. Больгинов

*Виталий Валериевич Больгинов, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории сверхпроводимости ИФТТ РАН (г. Черноголовка, Московской области) Проект РФФИ № 13-02-11507*

В работе описываются основные достижения в изучении джозефсоновских переходов сверхпроводник – ферромагнетик – сверхпроводник. Обсуждается влияние спинового антагонизма ферромагнетизма и сверхпроводимости, что позволяет создать джозефсоновские пи-контакты с отрицательным критическим током. Показано, что использование гистерезисных свойств ферромагнитного барьера позволяет реализовать элементы джозефсоновской магнитной памяти. Полученные результаты способны устранить основные проблемы, препятствующие развитию цифровой сверхпроводящей электроники.

## Введение

В 1970–80 гг сверхпроводящая цифровая электроника развивалась параллельно с «кремниевой» и рассматривалась как основной вариант дальнейшего развития цифровых электронных схем. Преимуществами сверхпроводниковых элементов является высокая характерная частота (десятки и сотни ГГц) и низкое энер-

гопотребление (менее 10-19 Дж на переключение), и возможность передавать информацию с помощью небольших импульсов тока, которые распространяются на сверхпроводящим линиям практически без потерь. В 90-х гг. сверхпроводниковая электроника отошла на второй план, поскольку огромный прогресс в традиционной схемотехнике выявил ряд принципиальных проблем: необходимость использования криогенных жидкостей, отсутствие воспроизводимой технологии изготовления джозефсоновских контактов, большой размер логических элементов и отсутствие энергоэффективной памяти, технологически совместимой со сверхпроводниковой цифровой технологией. В настоящее время в связи с ростом производительности современных вычислительных систем вопросы энергопотребления вновь становятся весьма актуальными и возрождают интерес к сверхпроводниковым элементам. Оказывается, за последние 20 лет был достигнут существенный прогресс в решении главных проблем сверхпроводниковой электроники: созданы компактные криорефрижераторы, не требующие криогенных жидкостей; отработана воспроизводимая технология изготовления джозефсоновских контактов Nb-AlOx-Nb; а также разработаны инверторы сверхпроводящей фазы и элементы памяти на основе джозефсоновских контактов с ферромагнитным барьером. Последние результаты были получены при финансовой поддержке РФФИ и являются предметом рассмотрения данной статьи.

### Сверхпроводимость.

Основными свойствами сверхпроводящих материалов являются нулевое сопротивление ниже некоторой критической температуры  $T_c$  (Камерлинг-Оннес, 1911 г.) и идеальный диамагнетизм – магнитное поле проникает в сверхпроводник только на небольшую глубину  $\lambda$ , экспоненциально убывая с удалением от границы сверхпроводника (эффект Мейснера-Окенсфеольда, 1933). В середине XX в. было показано, что сверхпроводник это квантовый объект, который должен описываться комплексной сверхпроводящей волновой функцией, зависящей от 3 пространственных координат и времени:

$$\Psi = \Psi_0(\mathbf{r}, t) \exp[-i\theta(\mathbf{r}, t)], \quad (1)$$

где квадрат модуля волновой функции  $\Psi_0^2$  определяет количество сверхпроводящих электронов в металле. Координатная зависимость  $\theta$  приводит к эффектам макроскопической квантовой когерентности, когда большой объект (кусочек сверхпроводника микронных или миллиметровых размеров) ведет себя как волновая частица. Простейшим эффектом такого рода является квантование магнитного потока

$\Phi = \mathbf{B}S$  в кольце ( $\mathbf{B}$  – индукция,  $S$  – площадь кольца). Суть его состоит в том, что при включении внешнего магнитного поля экранирующие токи в кольце подстраиваются таким образом, чтобы поток полного магнитного поля (то есть внешнего поля и поля экранирующих токов) был равен целому числу квантов потока

$$\Phi_0 = h/2e = 2,07 \cdot 10^{-15} \text{ Вб}. \quad (2)$$

Причина такого поведения кроется в том, что скорость движения сверхпроводящих электронов  $v_s$  определяется градиентом фазы сверхпроводящей волновой функции согласно обобщенному уравнению Лондонов [1]:

$$\hbar \mathit{grad} \theta = 2mv_s + 2eA, \quad (3)$$

где  $m$  – масса электрона, а  $A$  – векторный потенциал. Из уравнения (3) следует, что прохождение электрического тока через сверхпроводник или наложение магнитного поля создают градиент фазы сверхпроводящей волновой функции. В случае сверхпроводящего кольца появляется дополнительное условие, связанное с однозначностью сверхпроводящей волновой функции – изменение фазы  $\theta$  при обходе по замкнутому контуру должно быть кратно  $2\pi$ . С другой стороны, циркуляция вектора  $A$  при обходе по замкнутому контуру выражается через поток магнитного поля  $B = \mu_0 \mathit{rot} A$ <sup>1</sup>. Таким образом, интегрируя уравнение (3) по замкнутому контуру, находящемуся в глубине сверхпроводника, мы получаем, что магнитный поток через кольцо может принимать только значения, кратные кванту магнитного потока  $\Phi_0$ . Подстройка магнитного поля осуществляется за счет изменения величины и направления экранирующих токов.

### Эффект Джозефсона.

Неотъемлемой составной частью сверхпроводящих логических схем являются джозефсоновские переходы (или контакты). Джозефсоновский контакт возникает между двумя массивными сверхпроводниками, разделенными неким барьером, в котором сверхпроводимость каким-либо образом ослаблена. В качестве барьера может выступать, например, туннельный слой диэлектрика ( $NbO_x$ ,  $AlO_x$ ,  $MgO_x$  толщиной 1–2 нм), слой нормального металла (порядка 10–100 нм), точечный контакт двух сверхпроводников, сужение сверхпроводящей шины до 10–20 нм и т.д. Стационарный эффект Джозефсона состоит в том, что такая слабая связь способна пропускать бездиссипативный ток, не превышающий некоторого критического значения, определяемого видом и параметрами слабой связи. Особенностью джозефсоновских контактов является резкое изменение сверхпроводящей фазы внутри барьера. Это можно понять на основе аналогии с потоком жидкости в трубе переменного сечения. Уменьшение сечения трубы при неизменном потоке приводит к увеличению скорости движения жидкости, что в случае потока сверхпроводящих электронов приводит к большому градиенту сверхпроводящей фазы (*см. уравнение 3*). Поэтому обычно изменение фазы внутри барьера не рассматривают, а говорят о разности фаз сверхпроводящей волновой функции на значительном удалении от барьера (большем глубины проникновения магнитного поля). В стационарном эффекте Джозефсона сверхпроводящий ток через контакт связан с разностью фаз между сверхпроводящими берегами нечетным,  $2\pi$ -периодическим соотношением. Чаще всего встречается синусоидальное ток-фазовое соотношение

---

<sup>1</sup> Циркуляцию скорости сверхпроводящих электронов можно не рассматривать, если выбрать контур в глубине массивного сверхпроводника. См. [1].

$$I = I_c \sin \varphi, \quad (4)$$

где  $I_c$  – критический ток, то есть максимальный бездиссипативный ток, протекающий через контакт. При теоретическом анализе удобнее использовать критическую плотность тока  $j_c = I_c/A$ , где  $A$  – площадь поперечного сечения джозефсоновского контакта. Тогда ток-фазовое соотношение запишется в виде

$$j = j_c \sin \varphi, \quad (4')$$

где  $j = I/A$  – плотность сверхпроводящего тока через контакт.

Для определения  $I_c$  обычно измеряется зависимость напряжения на контакте от электрического тока через образец. В этом случае разность фаз  $\varphi$  подстраивается таким образом, чтобы выполнялось соотношение (4). Если это возможно, то напряжение на образце равно нулю. Если же ток  $I$  превысит критическое значение, то ур. (4) уже не будет иметь решения, и контакт перейдет в режим нестационарного эффекта Джозефсона. В этом случае разность фаз будет периодически изменяться со временем, причем скорость изменения  $\varphi$  определяется напряжением на контакте  $V$  согласно уравнению:

$$\hbar \partial \varphi / \partial t = 2eV.$$

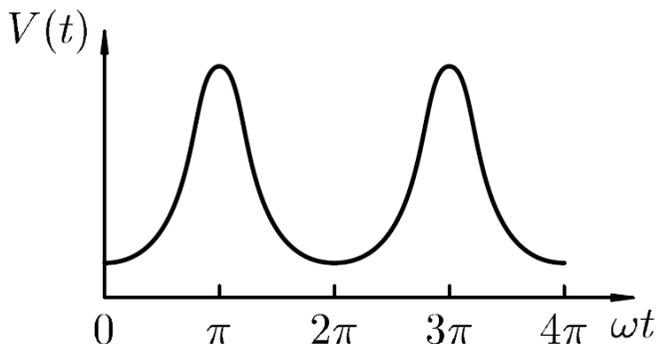
Напряжение на контакте также является периодической функцией времени, причем частота  $\omega$  определяется величиной полного тока через контакт:

$$V(t) = R_N(I - I_c^2)/(I + I_c \cos \omega t), \\ \omega = 2\pi R_N(I - I_c^2)/\Phi_0,$$

где  $R_N$  – сопротивление барьера. Среднее напряжение на контакте  $\langle V \rangle$ , измеряемое в ходе эксперимента, дается обычной для квантовой механики формулой

$$2e\langle V \rangle = \hbar\omega, \text{ или } \langle V \rangle = \Phi_0 f \quad (5)$$

На *рис. 1* приведена зависимость напряжения на контакте от времени в нестационарном режиме. Видно, что кривая похожа на последовательность импульсов напряжения. Именно такими импульсами кодируется информация в быстрой одноквантовой логике (БОК, RSFQ).



**Рис. 1.** Временная зависимость напряжения на джозефсоновском контакте в нестационарном режиме

Отметим, что согласно уравнению (5), частота повторения импульсов определяет среднее напряжение на контакте. Это дает метод определения характерной частоты работы БОК-схем в диапазоне до нескольких ТГц, где применение других методик затруднено или невозможно. Используя значение  $\Phi_0 = 2,07 \cdot 10^{-15}$  Вб можно получить коэффициент преобразования в виде  $k = 483$  ГГц/мВ.

### Сверхпроводящая электроника.

Для управления БОК-импульсами используются структуры, состоящие из сверхпроводящих колец с включенными в них джозефсоновскими контактами. Простейшей структурой такого типа является ПТ-СКВИД (СКВИД постоянного тока<sup>2</sup>), содержащий одно кольцо с двумя джозефсоновскими переходами а и b. Наличие замкнутого сверхпроводящего контура приводит к возникновению макроскопической квантовой когерентности между переходами. Другими словами, разности фаз на этих контактах  $\varphi_A$  и  $\varphi_B$  должны быть связаны соотношением, которое получается интегрированием уравнения (3) по замкнутому контуру:

$$\varphi_A - \varphi_B - 2\pi\Phi/\Phi_0 = 2\pi n. \quad (6)$$

С другой стороны, разности фаз  $\varphi_A$  и  $\varphi_B$  определяют величину сверхпроводящего тока через кольцо:

$$I_S = I_c^A \sin \varphi_A + I_c^B \sin \varphi_B. \quad (7)$$

Комбинируя уравнения (5–6) для симметричного СКВИДа  $I_c^A = I_c^B = I_0$ , получим ток-фазовое соотношение в виде:

$$I_S = \{2I_0 \cos(\pi\Phi/\Phi_0)\} \cdot \sin(\varphi_B + \pi\Phi/\Phi_0) \quad (8)$$

Видим, что критический ток ПТ-СКВИДа  $I_c = 2I_0 |\cos(\pi\Phi/\Phi_0)|$  является периодической функцией магнитного потока, которая имеет максимум при целочисленном потоке  $\Phi/\Phi_0$  и обращается в ноль при полуцелом потоке. Качественно это можно объяснить тем, что наложение внешнего магнитного потока на кольцо приводит к возникновению кругового экранирующего тока, который при  $I_S = 0$  равен

$$I_{\text{круг}} = \frac{1}{2} I_0 (\sin \varphi_A - \sin \varphi_B) = I_0 \sin(\pi\Phi/\Phi_0). \quad (9)$$

Этот ток достигает максимального значения именно при полуцелом потоке, что и определяет минимальное значение критического тока СКВИДа. Направление кругового тока при таком потоке неопределенно, т.к. компенсация внешнего потока  $\Phi_0/2$  и его дополнение до величины  $\Phi_0$  энергетически

<sup>2</sup> Для обозначения таких структур используются аббревиатуры: СКВИД от англ. SQUID (*Superconducting QUantum Interference Device*); или СКВИМП (*Сверхпроводящий Квантовый Измеритель Магнитного Потока*).

одинаково выгодны. Другими словами, возникает состояние неопределенности или «фрустрации».

Таким образом, приложение магнитного поля от внешнего источника дает возможность управлять критическим током кольца и, как следствие, прохождением сигналов через него. Кроме того, СКВИДы являются высокочувствительными датчиками магнитного потока, поэтому на их основе создаются измерители сверхслабых сигналов – магнитометры, пиковольтметры и т.д. Принцип действия таких устройств состоит в том, чтобы преобразовать измеряемую величину в магнитный поток через датчик СКВИДа.

В качестве примера сверхпроводниковой логической схемы рассмотрим T-FlipFlop (или T-триггер). Эта структура состоит из двух ПТ-СКВИДов, которые имеют одну общую сторону. Действие TFF состоит в том, что он принимает на вход последовательность пикосекундных импульсов и направляет их попеременно на два своих выхода. Чтобы создать два различных состояния TFF, средняя сторона содержит достаточно большую (порядка 10 пГн) индуктивность L. Ток питания, протекающий через L, создает через ячейки магнитный поток равный половине кванта, поэтому возникает две конфигурации экранирующих токов. В одной конфигурации этот поток компенсируется, а в другой – дополняется до величины  $\Phi_0$ . Ток входящего сигнала складывается с экранирующими токами и переводит два из четырех контактов в резистивное состояние. В первом случае это контакты 1 и 4, а во втором – 2 и 3. Импульсы с контактов 1 и 2 теряются, а импульсы с контактов 3 и 4 создают выходные сигналы «Out 0» и «Out 1».

Недостатком классических БОК-схем является наличие относительно большой индуктивности L. Во-первых, это не дает уменьшить размер базового логического элемента ниже 10 мкм. Во-вторых, через нее необходимо пропускать ток питания порядка 50 мкА, что уменьшает выгоду в энергопотреблении от перехода на сверхпроводниковую элементную базу. Поэтому возникает необходимость в разработке «источников фазового сдвига» способных заменить эту индуктивность.

### **$\pi$ -КОНТАКТ.**

Под источником фазового сдвига понимают элемент, включение которого в замкнутый сверхпроводящий контур создает такой же эффект, как наложение некоторого постоянного магнитного потока. Рассмотрим ПТ-СКВИД, в который включен источник фазового сдвига на  $\varphi$ . Это приведет к изменению условия однозначности сверхпроводящей волновой функции:

$$\varphi_A - \varphi_B - \varphi - 2\pi\Phi/\Phi_0 = 2\pi n.$$

Это изменение можно компенсировать, введя понятие эффективного магнитного потока  $\Phi_e$ :

$$\varphi_A - \varphi_B - 2\pi(\Phi + \Phi_e)/\Phi_0 = 2\pi n, \text{ где } \Phi_e = \varphi(\Phi_0/2\pi) \quad (10)$$

Из вышесказанного следует, что наибольший интерес представляет случай  $\Phi_e = \Phi_0/2$ . Тогда из уравнения (10) вытекает, что нам требуется источник фазового сдвига на  $\pi$  – пи-контакт. Поскольку изменение фазы сверхпроводящей

волновой функции на  $\pi$  приводит просто к изменению ее знака, такие элементы можно называть «фазовыми инверторами». Применительно к ПТ-СКВИДу, «включение» эффективного магнитного потока должно привести к сдвигу его полевой характеристики – зависимости критического тока от магнитного поля внешнего источника. В случае пи-контакта такой сдвиг будет полупериодическим, что и было обнаружено в работах [2,16].

Задача реализации пи-контакта вызывала большой интерес в период 1990–2010 гг, когда было предложено сразу несколько реализаций пи-контактов. Наиболее прямолинейной является сверхпроводящее кольцо, в котором захвачен ненулевой магнитный поток [3,4]. Понятно, что при обходе через  $\frac{1}{2}$  кольца сверхпроводящая фаза изменится на половину от ее полного изменения  $2\pi\phi - \varphi = \pi + 2\pi k$ . Однако при этом не удается решить проблему миниатюризации логических элементов, т.к. индуктивность кольца должна быть достаточно велика. Были предложены реализации на основе высокотемпературных сверхпроводников с нетривиальной симметрией сверхпроводящей волновой функции [5], а также на основе неравновесных эффектов в планарных субмикронных джозефсоновских мостиках [6]. Однако наиболее перспективной на сегодняшний день выглядит реализация пи-контакта в виде многослойных тонкопленочных джозефсоновских переходов с ферромагнитным барьером [7,8]. Дело в том, что пи-состояние в таких образцах возникает за счет их физических свойств (из-за взаимодействия ферромагнетизма и сверхпроводимости) и не требует никаких внешних воздействий. Кроме того, такие контакты технологически полностью совместимы с существующей технологией изготовления БОК-элементов на основе многослойных тонкопленочных контактов Nb-AlOx-Nb.

### **π-контакты с ферромагнитным барьером.**

Необычная физика джозефсоновских переходов с ферромагнитным барьером связана с антагонизмом сверхпроводников (S) и ферромагнетиков (F) по отношению к спиновому упорядочению. В микроскопической теории показывается, что носителями сверхпроводящего тока являются куперовские пары – пары электронов с противоположно направленными импульсами и спинами. Напротив, в ферромагнетиках существует выделенное, энергетически выгодное направление спина. То есть ферромагнитное взаимодействие стремится выстроить спины электронов в одном направлении. Качественно взаимодействие ферромагнетизма и сверхпроводимости в SF-гетероструктурах можно проиллюстрировать следующим образом [20]. Рассмотрим полубесконечную структуру сверхпроводник-ферромагнетик, в которой граница раздела перпендикулярна оси  $x$ . Из теории сверхпроводимости следует, что сверхпроводящая волновая функция будет проникать в нормальный (ферромагнитный) металл, затухая с удалением от границы S-области. Этот эффект называется эффектом близости, и именно он обеспечивает эффект Джозефсона в SFS-контактах. При попадании в ферромагнетик потенциальная энергия одного из электронов увеличится, а другого уменьшится на величину обменной энергии  $E_{ex}$ . Вследствие закона сохранения энергии, изменение потенциальной энергии должно быть компенсиро-

вано изменением кинетической. Поэтому первый электрон должен затормозиться, а второй – ускориться. Таким образом, импульсы электронов станут различными, а общий импульс куперовской пары будет отличным от нуля. С точки зрения квантовой механики это означает, что волновая функция пары умножится на комплексный множитель вида  $\exp(-iQx)$ , где  $Q$  – импульс куперовской пары в ферромагнетике. С другой стороны, куперовская пара с противоположными направлениями спинов получит противоположный импульс и умножится на  $\exp(iQx)$ . Усреднение по этим двум состояниям дает вещественную волновую функцию вида

$$\Psi = \frac{1}{2}(\Psi_+ + \Psi_-) = \Psi_0 \cos(Qx) \quad (11).$$

Таким образом, сверхпроводящая волновая функция осциллирует с удалением от SF-границы (*рис.1 цветной вкладки*). Понятно, что если мы выберем правую границу ферромагнетика там, где функция  $\Psi$  изменяет знак, то в основном состоянии волновые функции берегов также будут иметь разные знаки, что соответствует возникновению спонтанной разности фаз, равной  $\pi$ .

Приведенное рассуждение является весьма нестрогим. Например, помимо усреднения по спиновым состояниям, необходимо провести усреднение по углам, под которыми куперовские пары пересекают ферромагнитный барьер. Это приведет к появлению затухания сверхпроводящей волновой функции, обратно пропорциональному величине  $x$ . Кроме того, как правило, в экспериментальных структурах ферромагнитный барьер находится в диффузном пределе, когда толщина F-слоя много больше длины свободного пробега. Поэтому куперовские пары движутся по диффузным траекториям и волновая функция должна усредняться по всему набору доступных траекторий. Корректное рассмотрение физики SF-гетероструктур должно проводиться с использованием микроскопической теории, изложение которой выходит за рамки данной статьи. Однако можно провести качественную оценку характерных пространственных масштабов в ферромагнетике, исходя из соотношения неопределенностей. Согласно последнему, имеет место следующее соотношение между временем жизни куперовских пар в ферромагнетике  $\tau$  характерной энергией  $\Delta E$  распаривающих процессов

$$\tau \Delta E \sim \hbar. \quad (12)$$

За время  $\tau$  куперовская пара в диффузном ферромагнетике переместится на расстояние  $\xi = (D\tau)^{1/2}$ , где  $D$  – коэффициент диффузии. Величина  $\xi$  есть длина когерентности – характерный масштаб экспоненциального затухания сверхпроводящей волновой функции в диффузном нормальном металле<sup>3</sup>

$$\Psi = \Psi_0 \exp(-x/\xi). \quad (13)$$

<sup>3</sup> Экспоненциальный характер затухания сверхпроводящей волновой функции в нормальном металле вытекает из рассмотрения в рамках теории Гинзбурга-Ландау и микроскопической теории (см. [1], [8]).

Если нормальный металл не является ферромагнетиком, то разрушение куперовских пар происходит только за счет температурного распаривающего фактора  $2\pi k_B T$  и длина когерентности  $\xi$  обратно пропорциональна корню из температуры. В случае ферромагнетика ситуация более сложная, поскольку сверхпроводящая волновая функция не только затухает, но и осциллирует. Поэтому обменно-взаимодействию приписывают комплексный распаривающий фактор  $2iE_{ex}$ , где  $E_{ex}$  – энергия обменного взаимодействия, т.е. характерная энергия ферромагнитного упорядочения. В этом случае длина когерентности будет комплексной

$$\xi_F = (\hbar D / \{2iE_{ex} + 2\pi k_B T\})^{1/2}, \quad (14)$$

и удобно ввести действительную и мнимую длины когерентности  $\xi_{F1,2}$  согласно соотношению:

$$1/\xi_F = 1/\xi_{F1} + i/\xi_{F2}. \quad (15)$$

Подставляя уравнение (15) в формулу (13), можно убедиться, что длина  $\xi_{F1}$  определяет пространственный масштаб экспоненциального затухания функции  $\Psi$ , а мнимая длина определяет период ее осцилляций  $2\pi\xi_{F2}$ . Выражения для длин  $\xi_{F1,2}$  имеют вид [7]:

$$\xi_{F1,2} = (\hbar D / \{(E_{ex}^2 + [\pi k_B T]^2) \pm \pi k_B T\})^{1/2} \approx (\hbar D / E_{ex})^{1/2} \quad (16)$$

где знаки плюс/минус соответствуют действительной/мнимой длинам когерентности, а приближенное равенство имеет место для сильных ферромагнетиков  $E_{ex} \gg \pi k_B T$ .

Сделанные выше выводы также справедливы для критического тока (*рис.1 цветной вкладки*). Это неудивительно, поскольку согласно теории Гинзбурга-Ландау ток через джозефсоновский контакт выражается через сверхпроводящую волновую функцию. В работе [8] с использованием микроскопической теории было получено следующее выражение для критической плотности тока SFS-контакта:

$$J = j_0 \exp(-d_F/\xi_{F1}) [\sin(d_F/\xi_{F1}) + \{\xi_{F1}/\xi_{F2}\} \cos(d_F/\xi_{F2})]. \quad (17)$$

Из него следует, что критический ток экспоненциально убывает с ростом толщины барьера на характерной длине  $\xi_{F1}$  и осциллирует с периодом  $2\pi\xi_{F2}$ . При этом существуют диапазоны толщин, в которых знак критического тока является формально отрицательным. Поскольку максимальный бездиссипативный ток через контакт, по определению, величина положительная, отрицательный знак  $j_c$  свидетельствует об отрицательном знаке ток-фазового соотношения

$$J = -|j_c| \sin \varphi. \quad (18)$$

Учитывая, что  $-\sin \varphi = \sin(\varphi + \pi)$ , можно сказать, что изменение знака критического тока приводит к полупериодическому сдвигу ток-фазового

соотношения. Такой же сдвиг испытывает зависимость энергии джозефсоновского контакта от разности фаз  $E = E_J(1 \pm \cos \varphi)$ , где  $E_J = I_c \Phi_0 / 2\pi$ , а знак «+» относится к пи-контакту. Это означает, что минимум свободной энергии пи-контакта сдвигается из нуля в положение  $\varphi = \pi$ . Другими словами, в основном состоянии такой контакт будет иметь разность фаз  $\pi$ , то есть, будет пи-контактом.

Для экспериментального наблюдения осцилляций сверхпроводящей волновой функции необходимо правильно выбрать материал ферромагнитного барьера. Сильные одноэлементные ферромагнетики, такие как железо или никель, не очень удобны, так как энергия обменного взаимодействия в них очень велика, и длины когерентности, в соответствии с уравнением (16), очень малы (порядка нескольких ангстрем). Поэтому наиболее наглядные и достоверные результаты получаются при использовании слабоферромагнитных сплавов CuNi и PdFe с температурой Кюри перехода в ферромагнитное состояние 10–100 К. Дополнительное преимущество состоит в том, что при небольших обменных энергиях становится существенной температурная зависимость длин когерентности. Это дает возможно очень плавно изменять период осцилляций сверхпроводящей волновой функции и переводить образец из 0 в  $\pi$ -состояние путем изменения температуры. Наиболее наглядные результаты были получены в работе [8] при использовании сплава Cu<sub>0.47</sub>Ni<sub>0.53</sub>, который является ферромагнетиком с температурой Кюри около 60 К [12].

На *рис.1 цветной вкладки* приведена зависимость критической плотности тока от толщины слоя CuNi. Видно, что она имеет возвратный характер, то есть обращается в ноль при «критических» толщинах 11 нм и 22 нм. Эти точки соответствуют изменению знака ток-фазового соотношения на противоположный. Другими словами, в диапазоне толщин от 11 нм до 22 нм переходы Nb-Cu<sub>0.47</sub>Ni<sub>0.53</sub>-Nb являются пи-контактами. Отметим, что ширина области резкого изменения  $j_c$  в окрестности критических толщин очень мала – около 2 нм. Использование слабого ферромагнетика с температурой Кюри около 80 К позволило построить кривую  $j_c(dF)$  с достаточной степенью детализации и обнаружить положения 0-пи переходов. Кроме того, относительная слабость обменного взаимодействия позволяет наблюдать температурный переход между 0- и  $\pi$ -состояниями. Действительно, из уравнения (16) следует, что мнимая длина  $\xi F^2$  зависит от температуры, что может быть существенно, если отношение  $\pi k T_c / E_{ex}$  не слишком мало. Поэтому в узкой окрестности 0- $\pi$  перехода наблюдаются аномальные, возвратные температурные кривые, свидетельствующие об изменении знака ток-фазового соотношения. Температура 0- $\pi$  перехода, определяемая условием  $j_c(T) = 0$ , с ростом толщины примерно на 2 нм увеличивается от 0 до 9 К. Таким образом, изменение температуры позволяет регулировать период осцилляций сверхпроводящей волновой функции с очень малым шагом – около 0,2 нм/К.

Использование SFS-пи-контактов в качестве фазовых инверторов требует как можно большей критической плотности тока в  $\pi$ -состоянии. Действительно, согласно уравнению (11), включение  $\pi$ -контакта в ПТ-СКВИД вызовет появление кругового тока, порядка критического тока  $I_0$ . Этот ток,

протекая через  $\pi$ -контакт, изменит его разность фаз на величину порядка  $\delta\varphi \sim I_0/I_\pi$  (при  $I_0 \ll I_\pi$ ). Использование SFS-контакта в качестве пассивного элемента – стационарного фазового инвертора – предполагает, что величина  $\delta\varphi$  мала, то есть разность фаз на  $\pi$ -контакте не изменяется значительно в ходе эволюции состояния ПТ-СКВИДа. В работе [8] были получены образцы с максимальной критической плотностью тока 1 кА/см<sup>2</sup> при температуре жидкого гелия 4,2 К (*рис.1 цветной вкладки*). Оценки показывают, что образец размером 10x10 мкм будет иметь критический ток 1 мА, а образец 1x1 мкм<sup>2</sup> – порядка 10 мкА. Это не очень большая величина, поэтому дальнейший прогресс в изучении SFS-пи-контактов связан с увеличением максимальной критической плотности тока в пи-состоянии. Уже сейчас за счет оптимизации технологии изготовления образцов нами получены пи-контакты Nb-CuNi-Nb с максимальной критической плотностью 20 кА/см<sup>2</sup> при  $T = 4,2$  К [13]. Еще один путь связан с выбором оптимальной концентрации CuNi-сплава.

Несмотря на отмеченные недостатки, критическая плотность тока пи-контактов, полученная в работе [8], вполне достаточно для включения таких контактов в схемы БОК-логики. В работе [13] был проведен эксперимент, демонстрирующий работу TFF с пи-контактом Nb-Cu<sub>0.47</sub>Ni<sub>0.53</sub>-Nb [14]. Входной сигнал имел форму меандра с частотой 1 кГц. Этот сигнал поступал на вход dc/SFQ-конвертора, который на каждый положительный фронт входного сигнала генерировал импульс напряжения. Последовательность импульсов через линию передачи данных поступала на вход TFF. Последовательность импульсов с выхода TFF, имеющая половинную частоту, поступала через линию передачи данных на обратный преобразователь DC/SFQ, напряжение на котором изменялось от 0 до ~65 мкВ при прохождении каждого импульса. Таким образом, DC/SFQ-конвертор также является двукратным делителем частоты. Критический ток обычных, туннельных контактов составлял около 20 мкА, тогда как критический ток пи-контакта был примерно в 20 раз больше. Было обнаружено, что период выходного сигнала действительно в 4 раза больше периода входного, что свидетельствует о нормальной работе элемента TFF. Дальнейшее развитие этих работ может быть связано с демонстрацией энергоэффективности TFF с пи-контактом, определением предельной частоты работы таких схем, миниатюризацией элементов и т.д. Более того, в работе [2] была также продемонстрирована работа фазового кубита, содержащего пи-контакт Nb-CuNi-Nb. Освещение этих экспериментов выходит за рамки данной статьи, однако можно отметить, что в настоящее время исследуются различные виды кубитов на основе  $\pi$ -контактов, а также ведется изучение СВЧ-характеристик  $\pi$ -контактов Nb-CuNi-Nb.

### **Джозефсоновские магнитные переключатели.**

В последние годы активно развивается еще одно применение джозефсоновских переходов с ферромагнитной прослойкой. Физическая картина здесь проще, чем в случае пи-контактов, однако это не делает данное направление менее актуальным. Дело в том, что критический ток джозефсоновского контакта зависит от магнитного потока через его сечение. Причина состоит в том, что джозефсоновский переход можно разбить на бесконечное множество зам-

кнутых сверхпроводящих контуров, в каждом из которых должно выполняться условие однозначности сверхпроводящей волновой функции. В результате, приложение внешнего магнитного поля приводит к тому, что разность фаз  $\varphi$  становится линейной функцией координаты  $x$  (*рис.1 цветной вкладки*):

$$\varphi(x) = 2\pi Hxd/\Phi_0 + C, \quad (19)$$

где  $d$  – магнитная длина, которая складывается из двух глубин проникновения магнитного поля в сверхпроводник и толщины барьера. При этом возникнет сверхпроводящий экранирующий ток, периодическим образом изменяющийся с координатой. Для вычисления полного сверхпроводящего тока через контакт (то есть, вычисления ток-фазового соотношения) необходимо просуммировать токи

$$j_s = j_c \sin(2\pi Hxd/\Phi_0 + C) \quad (20)$$

через каждый элемент  $dx$ . Интегрирование дает ток-фазовое соотношение в виде

$$I_s = \{I_0 \sin(\pi\Phi/\Phi_0)/(\pi\Phi/\Phi_0)\} \sin \varphi(x=0)$$

Таким образом, полевая зависимость критического тока однородного контакта должна описываться соотношением Фраунгофера

$$I_c = I_0 |\sin(\pi\Phi/\Phi_0)/(\pi\Phi/\Phi_0)|. \quad (21)$$

В настоящее время наблюдение полевой зависимости критического тока является методом контроля макроскопической однородности образца. Только в этом случае можно вычислить критическую плотность тока, разделив максимальный критический ток на площадь контакта. Отметим, что полевая характеристика для SFS-контактов Nb-Cu<sub>0.47</sub>Ni<sub>0.53</sub>-Nb, исследованных при подготовке работы [8], с очень высокой точностью описывались соотношением Фраунгофера.

Вопрос об однородности прослойки очень важен при изучении SFS-контактов. Например, в окрестности толщины 0-пи перехода при изменении толщины на 2–3 нм критическая плотность изменяется на 3–4 порядка и, к тому же, меняет знак. Поэтому, даже очень малая неоднородность барьера способна привести к резкому искажению полевых кривых. Этот эффект наблюдался в работе [17]. Однако здесь надо отметить, что в этом случае зависимость  $I_c(H)$  является фактически Фурье-разложением от распределения критической плотности тока  $j_c(x)$

$$I_c(H) = \int j_c(x) \sin(2\pi Hxd/\Phi_0 + C) dx. \quad (22).$$

То есть, форма полевой кривой несет информацию о распределении критической плотности тока. Используя этот факт, в работе [17] был получен про-

филь функции  $j_s(x)$ , после чего на основе данных (*рис.1 цветной вкладки*). был построен эффективный профиль ферромагнитного барьера. Оказалось, что для радикального искажения формы полевой характеристики в окрестности 0- $\pi$  перехода достаточно неоднородности толщины всего лишь в 0,6 нм на длине порядка 0,8 мкм (8% от площади контакта). Поэтому в дальнейшем нами были разработаны технологические решения, позволяющие устранить даже такие малые неоднородности.

Однако в случае ферромагнитных материалов только структурной однородности недостаточно, поскольку характерным свойством ферромагнетиков является наличие доменной структуры. Это приводит к тому, что в уравнении (20) напряженность поля  $H$  необходимо заменить на индукцию  $V_y = H_y + 4\pi M_y$  (в данном разделе используется система ед. СГСМ), где ось  $y$  направлена перпендикулярно плоскости рисунка. При этом компонента  $M_y$  может являться сложной функцией координат  $x, y$ . Более того, компонента  $M_x$  также может быть отлична от нуля, что делает задачу двумерной и еще больше усложняет картину. Счастливым обстоятельством сплавов CuNi является то, что в них, по видимому, отлична от нуля только компонента  $M_z$ , которая не создает магнитного потока через контакт [12]. Поэтому образцы Nb-CuNi-Nb ведут себя по отношению к магнитному полю как обычные джозефсоновские контакты. При изменении материала барьера это условие может нарушиться.

В работе [18] были исследованы характеристики для SFS-контактов с другим составом барьера  $\text{-Nb-Pd}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}\text{-Nb}$  [18]. Было обнаружено, что для этих образцов проявляется еще один эффект, характерный для ферромагнетиков, но крайне необычный для джозефсоновских контактов – эффект гистерезиса. Это говорит о том, что намагниченность PdFe имеет компоненту  $M_y$ , причем она может существенно изменяться при приложении весьма слабых магнитных полей (2–3 Э). Форма полевой характеристики для «больших» образцов размером 30x30 мкм не описывалась уравнением (21), что говорит о магнитной неоднородности образца. Приложением более сильных полей (+10–15 Э) образец может быть намагничен до насыщения. При этом образец становится приблизительно магнитно-однородным, а полевая характеристика – квазипериодической, как в случае обычного джозефсоновского контакта. При изменении магнитного поля до  $-3$  Э кривая  $I_c(H)$  превращалась в набор хаотических пиков, что соответствует дроблению PdFe-барьера на домены в коэрцитивном поле. В больших полях PdFe опять намагничивалась до насыщения и полевая кривая становилась квазипериодической.

Известно, что возможность разделения образца на домены зависит от его размеров, и ниже некоторого размера ферромагнетик будет оставаться магнитно-однородным или монодоменным. Эта ситуация представлена на *рис.2 цветной вкладки*. Видно, что форма полевой кривой близка к Фраунгоферовой. Это свидетельствует о магнитной и структурной однородности образца. При этом гистерезисный характер полевой характеристики сохраняется. Магнитная однородность образца дает возможность восстановить кривую перемагничивания барьера из экспериментальной зависимости  $I_c(H)$  [18]. Действительно, магнитный поток через сечение контакта в нулях

фраунгферовой зависимости равен целому числу квантов, а магнитный поток в максимумах – примерно полуцелому:

$$\operatorname{tg}(\pi\Phi/\Phi_0) = \pi\Phi/\Phi_0; \Phi_{\max} \approx (n+1/2)\Phi_0, \Phi_{\max} \gg I.$$

Это дает возможность построить зависимость полного потока через контакт от внешнего магнитного поля и далее вычислить индукцию В и намагниченность прослойки (см. вставки к рис. 3). Таким образом, появляется возможность измерить намагниченность крайне слабых магнетиков – тонких ферромагнитных пленок, пропускающих сверхпроводящий ток.

Практическая важность таких образцов основана на том, что их критический ток зависит от магнитной предыстории. Таким образом, появляется возможность использовать их в качестве элементов магнитной памяти, кодируя информацию величиной критического тока. Несомненным достоинством переходов Nb-PdFe-Nb является их полная технологическая совместимость с существующей технологией БОК-схем. Однако прежде необходимо решить важную технологическую задачу: необходимо увеличить на несколько порядков сопротивление контакта, а точнее – критическое напряжение  $V_c = I_c R_N$ . Как было показано выше, среднее напряжение определяет скорость изменения напряжения на контакте, поэтому величина  $V_c$  характеризует скорость установления среднего напряжения на контакте. Для SFS-контакта размером  $10 \times 10$  мкм имеем

$$R_N \sim 100 \text{ мкОм}, I_c \sim 1 \text{ мА}, V_c \sim 100 \text{ нВ}, f \sim 50 \text{ МГц}.$$

Характерная частота 50 МГц слишком мала для работы в БОК-схемах в качестве активного элемента, потому что их характерная частота составляет 50–100 ГГц. Поэтому необходимо увеличить сопротивление образца на несколько порядков, не уменьшая критический ток. Наилучшие результаты были получены на образцах SISFs следующего состава: Nb-AlOx-(Nb)-PdFe-Nb. Фактически этот образец представляет собой два последовательно соединенных контакта: Sis и sFS. Слой (Nb) имел толщину, гораздо меньшую, чем глубина проникновения магнитного поля в Nb. Поэтому экранирующие токи, возникающие вследствие ненулевой намагниченности барьера, затекали через туннельный слой AlOx в нижний Nb-электрод и изменяли критический ток немагнитной, но высокоомной Sis-части. Толщина ферромагнитного барьера была выбрана таким образом, чтобы критический ток sFS-части был намного больше, чем Sis-части. В 2011–12 гг. в ИФТТ РАН было выполнено несколько экспериментов по реализации высокоомных магнитных джозефсоновских переключателей. Наиболее впечатляющие результаты были получены в работе [20]. В ней была продемонстрирована работа ячейки памяти с критической плотностью тока около  $2 \text{ кА/см}^2$  и характерной частотой – до 875 ГГц. Такие контакты более чем пригодны для использования в БОК-устройствах. В настоящее время ведутся работы по миниатюризации изготовленных элементов памяти и определению быстродействия ячейки по отношению к операции записи, то есть определению скорости перемагничивания ферромагнитного барьера.

## Заключение.

Таким образом, в ходе исследований, выполненных при финансовой поддержке РФФИ, был достигнут существенный прогресс в изучении свойств джозефсоновских переходов с ферромагнитным барьером. Было продемонстрировано наличие осциллирующей сверхпроводящей волновой функции, наведенной в ферромагнетике CuNi за счет эффекта близости. На основе полученных данных была разработана методика изготовления пи-контактов, пригодных для использования в цифровых и квантовых сверхпроводниковых элементах. Были проведены демонстрационные эксперименты, подтверждающие работоспособность схем с пи-контактами Nb-CuNi-Nb. Исследования контактов с магнито-мягким барьером PdFe позволили разработать магнитные переключатели, пригодные для интеграции в элементы сверхпроводниковой БОК-логики. Фактически можно сказать, что в ходе исследований удалось существенно продвинуться в решении основных проблем сверхпроводниковой электроники: большого размера базовых логических элементов и отсутствия быстрой энергоэффективной памяти, технологически совместимой с технологией изготовления БОК-элементов.

## Литература.

1. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников. М.: МЦНМО. – 2000.
2. Feofanov A.K., Oboznov V.A., Bol'ginov V.V., Lisenfeld J., Poletto S., Ryazanov V.V., Rossolenko A.N., Khabipov M., Balashov D., Zorin A.B., Dmitriev P.N., Koshelets V.P., Ustinov A.V. «Implementation of superconductor/ferromagnet/superconductor pi-shifters in superconducting digital and quantum circuits.» *Nature Physics* v.6. – N8, 2010. – PP. 593–597.
3. Majer J.B., Butcher J.R., Mooij J.E. 2002 *Appl. Phys. Lett.* 80 3638.
4. Balashov D., Dimov B., Khabipov M., Ortlepp Th., Hagedorn D., Zorin A.B., Buchholz F.Im., Uhlmann F.H., Niemeyer J. 2007 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 17 142.
5. Van Harlingen D.J. 1995 *Rev. Mod. Phys.* 67 515.
6. Baselmans J.A., Morpurgo A.F., Van Wees B.J., Klapwijk T.M. 1999 *Nature (London)* 43 397.
7. Ryazanov V.V., Oboznov V.A., Rusanov A.Yu., Veretennikov A.V., Golubov A.A., Aarts J. 2001 *Phys. Rev. Lett.* 86 2427.
8. Oboznov V.A., Bol'ginov V.V., Feofanov A.K., Ryazanov V.V., Buzdin A.I. 2006 *Phys. Rev. Lett.* 96 197003.
11. Buzdin A.I., Bujicic B., Kupriyanov Yu. *ЖЭТФ* т. 74, с. 124 (1992).
12. Veshchunov I.S., Oboznov V.A., Rossolenko A.N., Prokofiev A.S., Vinnikov L.Ya., Rusanov A.Yu., Matveev D.V. Письма в *ЖЭТФ*, v. 88, 873 (2008).
13. Oboznov V.A., Bolginov V.V., Rossolenko A.N., Ryazanov V.V. (to be published).
14. Khabipov M. I., Balashov D.V., Maibaum F., Zorin A.B., Oboznov V.A., Bolginov V.V., Rossolenko A.N., Ryazanov V.V. «A single flux quantum circuit with a ferromagnet-based Josephson p-junction». *Superconductor Science and Technology*. – V.23, N4. – 2010. – PP. 045032-1-045032-6.
15. Ryazanov V.V., Oboznov V.A., Veretennikov A.V. et. al. *Phys.Rev. B* v. 65 020501 (2002).

17. Frolov S.M., Van Harlingen D.J., Bolginov V.V., Oboznov V.A., and Ryazanov V.V. «Josephson interferometry and Shapiro step measurements of superconductor-ferromagnet-superconductor  $0-\pi$  junctions.» PHYSICAL REVIEW B 74, 020503 (R) (2006).
18. Больгинов, В.С. Столяров, Д.С. Собанин, А.Л. Карпович, В.В. Рязанов. Журнал «Магнитные переключатели на основе джозефсоновских переходов Nb-PdFe-Nb с магнитомягкой ферромагнитной прослойкой» Письма в ЖЭТФ т.95, N7. – 2012. – С. 408–413.
19. Larkin T.I., Bol'ginov V.V., Stolyarov V.S., Ryazanov V.V., Vernik I.V., Tolpygo S.K., Mukhanov O.A. «Ferromagnetic Josephson switching device with high characteristic voltage». Appl. Phys. Lett. v.100, pp.222601-1 - 222601-5 (2012).
20. Demler E.A., Arnold G.B., Beasley M.R. Phys. Rev. B. V. 55/ – P. 15174 (1997).

# Лучи притяжения

С. В. Сухов, А. С. Шалин

*Шалин Александр Сергеевич,*  
*кандидат физико-математических*  
*наук, старший научный сотрудник*  
*Ульяновского филиала Института*  
*радиотехники и электроники*  
*им. В.А. Котельникова РАН*  
**Сухов Сергей Владимирович,**  
*кандидат физико-математических*  
*наук, старший научный сотрудник*  
*Ульяновского филиала Института*  
*радиотехники и электроники*  
*им. В.А. Котельникова РАН*  
*Проект РФФИ № 13-02-11508*

**В** научно-популярной форме изложены текущие достижения в области создания «лучей притяжения», обеспечивающих передвижение объектов по направлению к источнику излучения. Рассмотрены варианты создания таких систем, показаны возможности реализации отрицательного радиационного давления и притягивающих оптических сил. Описаны основные имеющиеся теоретические и экспериментальные данные (в частности – полученные авторами проекта), касающиеся разработки «лучей притяжения».

## Под давлением света

Идея использования «лучей притяжения» уже давно встречается в научно-фантастических произведениях. Первые упоминания о таких лучах можно найти в романе Жюль Верна «В погоне за метеором», где один из персонажей с их помощью захватывает астероиды, пролетающие мимо Земли. Позднее данная тема начала активно применяться фантастами в книгах и фильмах, посвященных межзвездным путешествиям. Изображения летающей тарелки, похищающей с помощью подобного луча корову, стали стереотипной характеристикой поведения инопланетян на Земле. Интересно, что вплоть до недавнего времени у ученых не было ни малейшего представления о том, как такие лучи могут работать [

]. Дело в том, что свет или, в более широком смысле, электромагнитные волны, не притягивает, а наоборот, оказывает давление на освещаемые объекты, передавая им импульс в направлении распространения пучка. Именно это явление частично объясняет тот факт, что хвосты комет обращены в направлении от солнца: частицы пыли из ядра кометы разгоняются солнечным светом. Давление солнечного света предполагается использовать и для межпланетных либо межзвездных путешествий при помощи солнечных парусов.

Понять причину возникновения давления света проще всего из закона сохранения импульса. Согласно корпускулярному описанию, световой луч можно представить состоящим из частиц – фотонов. Каждая из этих частиц обладает импульсом  $\vec{p}_{ph} = \hbar\vec{k}$ , где  $\vec{k}$  – волновой вектор и  $\hbar$  – постоянная Планка. При рассеянии или поглощении фотонов произвольным объектом величина импульса фотона в первоначальном направлении уменьшается (*рис.1 цветной вкладки*). Поэтому, для выполнения закона сохранения импульса

$$\vec{p}_{ph}(1) = \vec{p}_{ph}(2) + \vec{p}_K \quad (1)$$

необходимо, чтобы рассеивающий объект приобрел скорость в направлении первоначального распространения фотонов, что и является проявлением давления света или, что то же самое, радиационного давления. Соответственно, заставить предмет двигаться в противоположном направлении представляется проблематичным.

Первая прямая демонстрация светового давления была произведена русским ученым Петром Николаевичем Лебедевым в 1899 г. путем наблюдения отклонений крутильных весов в вакуумной камере. Следует сказать, что давление, создаваемое светом, довольно мало. Так, в ясный солнечный день интенсивность солнечного света составляет около 1,4 кВт/м<sup>2</sup>. Соответственно, давление солнечных лучей на земную поверхность будет составлять около 5 мкПа. То есть сила, действующая на один квадратный метр поверхности (5 мкН) примерно такая же, как и вес человеческого волоса. Таким образом, чтобы действие радиационного давления проявилось, то есть чтобы облучаемые объекты при наличии силы трения двигались, они должны быть очень легкими, либо свет должен быть очень интенсивным. Другой вариант – это поместить объекты в окружение, где на них не действуют силы сопротивления движению (диссипативные силы), например, в вакуум. В этом случае, если объект освещается продолжительное время, то действие радиационного давления может наблюдаться и для достаточно массивных тел. На этом, в частности, основана идея солнечного паруса.

Из-за того, что оптические силы весьма малы, особое внимание им стали уделять только после появления лазеров, позволяющих создавать очень интенсивные поля. В 70-х гг. XX в. Артур Ашкин (*A. Ashkin*) продемонстрировал действие оптического излучения на микроскопические частицы. В 80-х гг. он же создал первые оптические ловушки, способные с помощью сфокусированного лазерного луча удерживать небольшие (100 нм–10 мкм) объекты. Перемещение области фокусировки луча, где его интенсивность наиболее высока, позволяло произвольно передвигать захваченные объекты, в том числе

в направлении от источника света, либо к нему. Оптические ловушки были первым инструментом, который пресса окрестила «лучами притяжения». В настоящее время оптические ловушки интенсивно используются для биологических исследований, конструирования наноструктур, исследования свойств отдельных атомов и молекул и т.д. Использование вместо одного фокуса нескольких, создаваемых динамическими голограммами, позволило манипулировать одновременно несколькими микроскопическими объектами, создавая всевозможные микро- и наноконструкции.

### **«Лазерные коровы»**

Как бы ни были хороши оптические ловушки, их все же нельзя назвать «лучами», поскольку их действие ограничено небольшой областью фокусировки. Как же сделать так, чтобы действие лучей распространялось на значительное расстояние, и при этом они притягивали объекты к источнику света вместо того, чтобы их отталкивать? Если вернуться к формуле (1), то можно заметить, что изменить направление импульса освещаемого объекта (а вместе с этим и направление действия силы) можно, если величина импульса фотонов после рассеяния будет больше, чем до него. Один из вариантов увеличения импульса – это увеличение числа рассеянных фотонов. Именно этим свойством обладают лазеры и иные квантовые усилители электромагнитных волн: вынужденное излучение внутри активной среды приводит к испусканию большего числа фотонов, нежели на нее падает. Это не нарушает закон сохранения энергии, так как необходимая энергия сообщается лазерам дополнительным внешним источником (так называемой, накачкой). Таким образом, активная (лазерная, усиливающая) среда, освещаемая обычным лучом, может притягиваться источником света. Эта концепция луча притяжения предложена недавно несколькими авторами [2,3], однако экспериментальной проверки пока произведено не было, в том числе и потому, что специальную активную лазерную среду нужно еще и создать, а окружающие нас предметы в обычных условиях лазерами не являются. Впрочем, недавно ученым удалось превратить в квантовый усилитель отдельную клетку [4], так что, возможно, в не столь далеком будущем обычными лучами можно будет притягивать и коров, превращенных целиком в лазер.

### **За пределами обыденности**

Другой вариант получения оптических сил притяжения связан с использованием не усиливающих, а других экзотических сред – метаматериалов. Приставка «мета» происходит от греческого слова, означающего «за пределами», таким образом, метаматериалы – это среды со свойствами, выходящими за пределы свойств обычных материалов. К примеру, метаматериалы с отрицательным показателем преломления (СОПП) обладают уникальным свойством обращения направления фазовой скорости электромагнитных волн, которая в такой среде противоположна направлению распространения энергии. На основе этого в своей пионерской работе по СОПП [5] Виктор Георгиевич Веселаго предположил, что помещенные в метаматериал предметы будут испытывать притяжение к источнику света, а не отталкивание

от него. Возможность получения такого отрицательного светового давления все еще обсуждается в научной литературе, поскольку экспериментальной проверки пока произведено не было. Это связано, во-первых, с тем, что производство СОПП сопряжено с существенными техническими трудностями, а, во-вторых, все разрабатываемые в настоящее время СОПП являются твердыми материалами, что препятствует движению любого заключенного внутри объекта. В ряде теоретических работ были предложены другие метаматериальные структуры, в которых могут возникнуть силы притяжения. Например, в работах [6, 7] показано, что при определенных условиях серебряные наночастицы, помещенные на поверхность среды, могут при облучении светом сверху отталкиваться от нее и некоторое время двигаться в направлении к источнику. Эта идея развита нами в работах [8, 9] где предлагается использовать специфическую плазмонную систему (наноантенну), в которой падающий свет фокусируется в области, много меньшей длины волны (что невозможно при использовании обычных линз), в результате чего многократно возрастает интенсивность поля в фокусе (*рис.2 цветной вкладки*). Объекты, помещенные в подобную структуру, специально подбираются так, чтобы отталкиваться от максимума поля (свойством отталкивания от максимума поля обладают частицы с отрицательной реальной частью поляризуемости). Эта система, таким образом, действует как ускоритель (в отличие от описанных ранее оптических ловушек, где тела притягиваются к максимуму поля), разгоняющий микро- и нанообъекты в направлении, произвольном по отношению к падающему пучку и, в частности, – в направлении к источнику света [8,10,11]. Однако подобные теоретические идеи требуют экспериментальной проверки и воплощения.

### Без экзотики

В принципе, для того, чтобы получить силу, действующую по направлению к источнику, а не от него, применять метаматериалы или плазмонные структуры не обязательно. Достаточно использовать то, что нас повсеместно окружает – воздух. В 2010 г. австралийская группа ученых под руководством Юрия Семеновича Кившаря продемонстрировала прецизионное манипулирование небольшими, диаметром 0,1 мкм, угольными пылинками на расстоянии около метра [12]. Основная идея заключалась в использовании не оптических, а тепловых сил – радиометрического эффекта. Интересно заметить, что именно с этим эффектом связано первое ошибочное сообщение об экспериментальной регистрации оптического давления. Во второй половине XIX в. В.Крукс (*W.Crookes*) в одной из своих публикаций сообщил об обнаружении оптического давления в крутильных весах. И только спустя некоторое время было замечено, что его весы вращались в противоположную сторону по сравнению с предсказанием относительно действия оптического давления. Молекулы воздуха в недостаточно откаченной камере с крутильными весами сообщали дополнительный импульс при отражении от нагретой светом стороны тела. В экспериментах Ю.С. Кившаря те же самые тепловые силы позволяли перемещать частички в специально сконструированном пологом луче. Изменяя параметры луча (например, меняя длину волны или размер полости), можно было

нагревать переднюю или заднюю стороны перемещаемых частичек, изменяя направление их движения.

Наши недавние исследования показали, что обычные среды можно использовать для достижения эффекта притяжения и без нагрева объектов, полагаясь исключительно на оптические силы [13]. Чтобы изложить суть предложенного нами подхода, необходимо вначале пояснить, что происходит с импульсом фотона, когда он переходит из одной среды в другую. На этот вопрос не так просто ответить, как может показаться. Дело в том, что в одних ситуациях импульс фотона ведет себя так, как будто он становится меньше (например, при пролете фотоном прозрачного предмета в вакууме), в других случаях получается так, что он увеличивается (например, при отражении фотона от зеркала, помещенного в прозрачную жидкость). Эта неопределенность получила название «противоречие Абрагама-Минковского». Наличие данной неопределенности объясняется тем, что в материальной среде недостаточно учитывать импульс только фотона, сама среда тоже приобретает какой-то импульс и воздействует на предметы, находящиеся внутри нее. При этом получается, что эффективный импульс фотона (учитывающий и действие среды) увеличивается в  $n$  раз, где  $n$  – это коэффициент преломления среды. Это явление можно использовать для получения сил притяжения – нужно лишь поместить предмет на поверхность жидкости, например, на водную поверхность и добиться, чтобы большинство лучей преломлялось в воду (*рис.3 цветной вкладки*). Импульс фотона в воде становится больше, и для выполнения закона сохранения импульса предмету необходимо начать двигаться по направлению к источнику света.

Данная общая концепция была проверена нами экспериментально [13]. Мы использовали маленькие капли масла на поверхности воды и показали, что они действительно притягиваются лазерным лучом и движутся по направлению к источнику света (*рис.4 цветной вкладки*).

## Игра со светом

Вместо того чтобы пытаться изменить облучаемый предмет (как в случае активных сред) или использовать окружающую среду для придания дополнительного импульса предметам, можно изменить свойства самого оптического луча. Прогресс в этом направлении был достигнут недавно в связи с изучением свойств недифрагирующих пучков (НП). Дифракция – это явление, приводящее к уширению с расстоянием даже самых хороших лазерных лучей. Так, красный лазерный луч с первоначальным размером 1 мм при прохождении расстояния в 10 м неизбежно увеличится в диаметре почти до сантиметра. Недифрагирующие пучки, однако, обладают свойством сохранять первоначальный размер во всей области существования. Электрическое поле внутри НП можно записать в следующем виде:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}(x, y) \exp(ik_z z),$$

$$\vec{E}(x, y) = \vec{e} \int_{-\pi}^{\pi} A(\varphi) \exp[ik_t (x \cos \varphi + y \sin \varphi)] d\varphi.$$

где  $k^2 = k_t^2 + k_z^2$  и  $k$  – волновое число, а  $\varphi$  – азимутальный угол относительно направления распространения.  $\vec{E}(x, y)$  – распределение электрического поля в поперечнике пучка, остающееся постоянным при любом  $z$ . Формула (2) говорит нам, что любой НП можно представить в виде суперпозиции плоских волн, распространяющихся под углом  $\theta = \arctan(k_t / k_z)$  относительно направления распространения пучка (ось  $z$ ). Частным случаем НП являются пучки Бесселя, в которых амплитуды волн, составляющих пучок, постоянны  $|A(\varphi)| = \text{const}$ . Из формулы (2) следует, что волновое число НП  $k_z$  меньше такового для плоской волны, распространяющейся в той же среде. Если наложить друг на друга два бесселевых пучка с разными волновыми числами  $k_{z1}, k_{z2}$ , то между ними возникнут биения. Пучности этих биений создают череду оптических ловушек, положение которых в пространстве можно менять путем изменения фазы между наложенными пучками. Экспериментально такие лучи были реализованы при помощи конических линз (аксиконов) и пространственных модуляторов света. В недавних экспериментах [14, 15], проведенных в США и Чехии, захваченные такими лучами микроскопические стеклянные сферы удалось произвольно перемещать вдоль подобного «оптического конвейера».

Использовать НП для притяжения объектов можно и по-другому. Путем наложения большого количества пучков Бесселя ученые из США создали соленоидальные лучи, максимумы интенсивности в которых распределены по спирали [16]. Помещенная в такой пучок частица может начать спирально двигаться по направлению к источнику света. Такие лучи работают аналогично винту Архимеда, заставляющему воду двигаться вверх, вопреки силе гравитации. В наших исследованиях мы также предложили свой вариант пучка притяжения на основе спиральных лучей [17]. Наш способ основан на эффекте супер-осцилляций, который заключается в том, что при наложении нескольких медленно меняющихся периодических функций могут возникнуть локальные участки, содержащие осцилляции с частотами, выходящими за пределы используемого спектра первоначальных функций. Так, например, при наложении нескольких пучков Бесселя с волновыми числами  $k_{z1} > 0, k_{z2} > 0$ , распространяющихся вдоль оси  $z$ , могут возникнуть пространственные области, где волны распространяются в противоположную сторону ( $k_z < 0$ ). Такие участки имеют размеры намного меньше длины волны и их интенсивность существенно уступает интенсивности в соседних областях. Таким образом, с помощью супер-осцилляций можно манипулировать только нанометровыми частицами с отрицательной реальной частью поляризуемости.

Вновь возвращаясь к уравнению (1), можно предложить еще один путь увеличения импульса фотона после рассеяния. Нужно, чтобы импульс *падающего* фотона был как можно меньше! Точнее, речь идет не о самом импульсе, а о его проекции на направление  $z$ , вдоль которого мы хотим перемещать предмет. Если заставить объект рассеивать свет вдоль оси  $z$ , то импульс фотонов вдоль этого направления увеличится, и на предмет будет действовать сила, направленная к источнику излучения. В одной из наших работ [18] мы показали, что такого направленного рассеяния можно добиться, освещая объект специально сконструированным недифрагирующим пучком (*рис.5 цветной*

**вкладки**). Как уже говорилось при обсуждении формулы (2), НП можно составить из волн, распространяющихся под углом к оси  $z$ . Подбирая фазу этих волн, можно добиться того, чтобы результирующая волна преимущественно рассеивалась в направлении (**рис.5 цветной вкладки**). Произведенные расчеты показали, что если при облучении объекта неоптимизированным полем с интенсивностью  $1,3 \text{ мВт/мкм}^2$  сила составляла  $1,2 \text{ пН}$  (отталкивание от источника), после оптимизации пучка сила становилась равной  $-0,9 \text{ пН}$  (притяжение к источнику). При этом свойство НП быть неизменными вдоль всей оси обеспечивает постоянство этой силы при произвольном перемещении объекта.

Экспериментально подобрать луч притяжения для сложного объекта, который к тому же может поворачиваться, довольно трудно. Поэтому первый эксперимент на описанных выше принципах был проведен на простых микроскопических сферах [19, 20]. Однако с развитием техники микроманипулирования данный подход можно будет использовать и на более сложных предметах и структурах.

В заключение отметим, что многие явления, которые когда-то казались людям фантастическими, со временем занимают место в повседневной жизни. Это же может произойти и с лучами притяжения. Уже сейчас специалисты NASA оценивают перспективы использования таких пучков для сбора микроскопических образцов в космосе и на других планетах. Лучам притяжения найдется место и на Земле, где с их помощью можно будет, например, доставлять объекты в области, которые нежелательно подвергать механическому воздействию. Перспективно использовать эти лучи в различных микромашинах, например, нанопринтерах, микро-сортировочных устройствах и т.д. Помимо этого, уже сейчас существуют методы, которые могут привести эти лучи из области микромира в наш повседневный макромир, что откроет еще больше возможностей для их использования.

К сожалению, в рамках данной статьи мы не смогли рассказать обо всех проявлениях оптических сил притяжения. Заинтересованные читатели могут найти дополнительную информацию в нашем обзоре по этим оптическим силам [ ].

## Литература

1. *Wilk S. R.* // Optics & Photonics News. – 2009. – V.20. – P.12–13.
2. *Mizrahi A., Fainman Y.* // Opt. Lett. – 2010. – V.35. – P.3405–3407.
3. *Webb K. J., Shivanand K.* // Phys. Rev. E. – 2011. – V.84. – P.057602.
4. *Gather M. C., Yun S. H.* // Nature Photon. – 2011. – V.5. – P.406–410.
5. *Веселаго В. Г.* // УФН. – 1967. – Т.92, №7. – С.517-526.
6. *Шалин А. С.* // Физика металлов и металловедение. – 2011. – Т.112, №1. – С.39-46.
7. *Huang L, Martin O.J.F.* // Opt. Lett. – 2008. – V.33. – P.3001-3003.
8. *Shalin A. S., Sukhov S. V.* // Plasmonics. – 2013. – V.8. – P.625–629.
9. *Шалин А. С., Сухов С.В.* // Квантовая электроника. – 2012. – Т.42, №4. – С.355–360.
10. *Шалин А. С.* // Радиотехника и электроника. – 2011. – Т.56, №8. – С.970–979.
11. *Shalin A. S., Sukhov S. V., Krasnok A. E., et al.* // PIER (submitted).
12. *Shvedov V. G., Rode A.V., Izdebskaya Y. V., et al.* // Phys. Rev. Lett. – 2010. – V.105. – P.118103.

13. *Kajorndejnkul V., Ding W., Sukhov S.V. et al.* // Nature Photon. (submitted).
14. *Cizmár T., Kollárová V., Bouchal Z. et al.* // New J. Phys. – 2006. – V.8. – P.43.
15. *Ruffner D. B., Grier D. G.* // Phys. Rev. Lett. – 2012. – V.109. – P.163903.
16. *Lee S. H., Roichman Y., Grier, D. G.* // Opt. Express. – 2010. – V.18. – P.6988–6993.
17. *Sukhov S., Dogariu A.* // Opt. Lett. – 2010. – V.35. – P.3847–3849.
18. *Sukhov, S., Dogariu, A.* // Phys. Rev. Lett. – 2011. – V.107. – P.203602.
19. *Chen J., Ng J., Lin Z., et al.* // Nature Photon. – 2011. – V.5. – P.531–534.
20. *Brzobohatý O., Karásek V., Šiler M., et al.* // Nature Photon. – 2013. – V.7. – P.123–127.
21. *Dogariu A., Sukhov S.V., Sáenz J. J.* // Nature Photon. – 2013. – V.7. – P.24–27.

**ХИМИЯ  
И НАУКИ  
О МАТЕРИАЛАХ**

# Как триплетный кислород пишет спинами штрих-код

Моргунов Р. Б., Коплак О.В.

*Институт проблем химической физики РАН, Черноголовка  
Проект РФФИ № 13-03-11500*

Представлены результаты исследования спин-зависимой реакции триплетного кислорода с кремнием. Показано, что использование этой химической реакции в технологиях создания квантового компьютера позволяет создать «ключ», считывающий информацию о ядерных спинах изотопа кремния  $^{29}\text{Si}$ . Избирательное окисление поверхности кремния в местах расположения магнитных ядер является «фотографией» кубита. Предложенный «ключ» открывает способ надежного и простого считывания квантовой информации в существующих полностью кремниевых квантовых логических устройствах.

Предел плотности логической памяти для наноразмерных устройств электроники в настоящее время уже почти достигнут. Электронные логические вентили состоят из частиц размерами  $\sim 10$  нм (сравнимой с длиной волны Де Бройля), и дальнейшее понижение их размера не обещает сильного уплотнения информации, давая при этом огромные технические осложнения. Стремление записать один бит в один атом продвинет классические компьютеры не более чем на 1–2 порядка величины на пути уплотнения информации и скорости ее обработки. Старый подход, в чем-то исчерпав себя, одновременно переходит в новый физический принцип, связанный с уменьшением размеров приборов – создание квантовых битов (кубитов). Для их реализации приходится изменить сами принци-

пы хранения, записи и обработки информации, математику, управляющую этим процессом. На смену арифметическим операциям Булевой алгебры приходит математический аппарат квантовой механики, богатый чудесами интерференции волновых функций микрочастиц, иногда не позволяющими признать, что  $2^2 = 4$ . Например, две частицы со спинами представляют собой простейший ансамбль с волновыми спиновыми функциями одного синглетного – S и трех триплетных (T) состояний (т.е. способны хранить четыре бита). Будучи изолированными друг от друга, эти частицы способны хранить лишь по одному биту информации. Таким образом, увеличение числа единиц информации с числом частиц растет как  $\sim 2N$ , что значительно быстрее, чем в классической памяти, где число сохраненных бит пропорционально числу ячеек  $\sim N$ .

Различие между логическими кодами современных компьютеров и способом квантовой записи информации напоминает разницу между алфавитом и иероглифами. В случае квантового подхода волновые функции многих частиц образуют единую волновую функцию ансамбля. При этом «запоминание» происходит не по очереди, в виде отдельных разрядов-частиц, изменяющих свое состояние, а одновременно во всем ансамбле. Сохраняемая информация затрагивает волновые функции всех частиц одновременно и представляет собой квантовый штрих-код. Ситуация сходна с рисунком (иероглифом), обозначающим какое-либо японское слово, например, «магнит» (рис. 1). Элементы этого рисунка не читаются по отдельности, а информация, переносимая иероглифом, считывается глазом одновременно и включает в себя значительно больше, чем то, что можно передать с помощью одной буквы. Иероглиф – исторически сложившийся штрих-код, комбинация первоначальных рисунков-представлений о мире и своего рода «волновая функция» человеческого сознания, компилирующая простые образы.

Создание квантовой памяти требует конкретной материальной реализации. Можно ли использовать ядерные спины, управляющие химической реакцией, для сохранения и обработки квантовой информации? Как осуществить эту идею на практике? Фундаментальные основы и путь к спиновому квантовому компьютеру на ядерных спинах были заложены давно в результатах классических работ А.Л.Бучаченко, открывшего магнитный изотопный эффект в химических реакциях [1]. В [1] составлен практически атлас самых разнообразных химических реакций, управляемых ядерными спинами в различных материалах. Какой же из материалов сегодня представляется наиболее перспективным для конструирования квантового компьютера?

Главным претендентом на пути создания ядерных спин-селективных кубитов оказался кремний, легко совместимый с уже существующими кремниевыми устройствами стандартной Булевой логики. (Эта интригующая совместимость аналогична японскому языку, который комбинирует алфавит и иероглифы). Кремний состоит из трех изотопов  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$  и  $^{30}\text{Si}$  с естественной распространенностью: 92,2 %  $^{28}\text{Si}$ , 4,7 %  $^{29}\text{Si}$  и 3,1 %  $^{30}\text{Si}$ . Вопреки широко распространенному мнению о том, что изменение физических и химических свойств кремния, вызванное обогащением изотопами,

**Рис. 1.** Японский иероглиф (Jishyaku – магнит) объединяет два иероглифа: «магнитный» (первый иероглиф) и «камень» (второй иероглиф). Первый иероглиф участвует во всех словах, сообщающих о магнетизме (магнитная восприимчивость, стрелка компаса и др.)

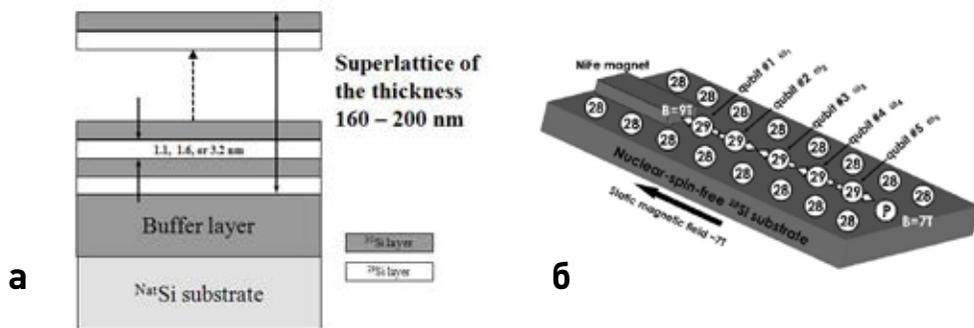


незначительно, имеется ряд экспериментальных доказательств, опровергающих эту точку зрения. О такой работе, производимой как российскими, так и зарубежными коллективами, сообщается в этой статье.

По иронии судьбы именно японские ученые (в соавторстве с американскими) первыми создали полностью кремниевые кубиты [2–4]. Сначала было показано, что различие между ядерными спинами I изотопов кремния ( $I=1/2$  для  $^{29}\text{Si}$ , но  $I=0$  для  $^{28}\text{Si}$  и  $^{30}\text{Si}$ ) сильно изменяет физико-химические свойства наноструктур. Впервые в мире были созданы образцы, в которых тонкие слои (1–3 нм), обогащенные различными изотопами ( $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$  и  $^{30}\text{Si}$ ), чередовались в очень аккуратной сверхрешетке, выполненной с нанометровой точностью [2] (*рис. 2 а*).

Идея применения одиночного атома кремния с магнитным ядром в качестве бита и процессора была предложена в [4]. Реализация этой концепции показана на *рис. 2б*. В этом устройстве ориентация и фаза каждого спина ядра  $^{29}\text{Si}$  в цепочке эквивалентна биту информации. Ключом к считыванию является атом фосфора с электронным спином, помещенный на конце цепочки и «считывающий» информацию, записанную в цепочке ядерных спинов кремния. Реализация такого квантово-механического устройства оказалась возможна благодаря выполнению следующих условий:

- 1) Изотопно-очищенный кремний без парамагнитных примесей обладает гигантским временем удержания квантовой информации – при комнатной температуре спины ядер  $^{29}\text{Si}$  остаются ориентированными 25 секунд [7]. Этого времени вполне достаточно, чтобы произвести миллиарды логических операций.
- 2) Спиновая когерентность электронного спина фосфора допускает передачу информации о состоянии кубитов через сверхтонкое взаимодействие с ядрами  $^{29}\text{Si}$  [8]. Таким образом, электронный спин фосфора на конце цепочки дирижирует работой всех кубитов в ней.
- 3) Цепочки ядер  $^{29}\text{Si}$  удалось создать и доказать их согласованную работу [9].
- 4) Инициализация прибора (ориентирование всех спинов в одном направлении) осуществлялась оптической накачкой [10], а также динамической ядерной поляризацией с помощью электронного спина фосфора. Манипуляции спинами ядер кремния была произведена с помощью ядерного магнитного резонанса.



**Рис. 2.** а – гетероструктура, состоящая из чередующихся слоев кремния магнитного и немагнитного изотопов, б – схема ядерного спинового процессора на изотопах кремния [4]. Слева указаны номера кубитов и их рабочие частоты  $w_i$

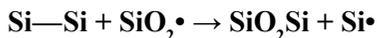
5) В качестве метода считывания с ансамбля ядерных спинов ЗІР были использованы два метода: оптический и электрический. В качестве электрического метода считывания (разработанного при участии российских ученых из Физико-технического института РАН им.А.Ф.Иоффе [11]) был использован факт передачи информации от цепочки кремниевых ядер к ядру фосфора. А для считывания информации с ядра фосфора использовали электродипольный магнитный резонанс в небольшом магнитном поле ( $\sim 200$  Э), который создавал запутанные состояния Бэлла между ядерной подсистемой и электронным спином, т.е. под действием микроволнового электрического поля возникали квантовые иероглифы – штрих-коды, нужные для обработки информации и установления одновременно и электронных и ядерных спиновых состояний [11].

Таким образом, создание реального устройства квантовой памяти требует выполнения целого ряда вышеперечисленных высокотехнологичных условий, реализуемых только в рамках нанотехнологий и оборудования, пригодного для манипулирования одиночными атомами. Одним из главных условий записи-считывания информации (общения с кубитной памятью) является надежное и сильное влияние ядерных спинов на состояния электронных спинов в считывающем устройстве. Этот элемент (называемый «ключом») в [2–10] предлагалось выполнить в виде концевой атома фосфора, обладающего электронным и ядерным спинами, связанными эффективным сверхтонким взаимодействием (*рис. 2 б*).

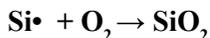
Отметим, что и здесь продолжается аналогия с японским языком. «Ключом» в первом иероглифе на рис. 1 называют изображение второго иероглифа («камень»), включенного также и в первый иероглиф («магнит»). Именно по нему находят это слово в словаре, относят к определенной группе иероглифов. «Ключ» одинаково открывает двери в семантический анализ информации в японском языке и при считывании квантового «слова».

В рамках нашего проекта РФФИ (10-03-00314а) предложен более надежный, воспроизводимый и удобный в технической реализации «ключ». Его

реализация возможна на основе химической реакции между кремнием и кислородом, управляемой внешним магнитным полем и магнитным полем ядер [12–15]. Кислород является основной примесью в кристаллах кремния, поверхность которых всегда покрыта тонкой пленкой оксида SiO<sub>2</sub>. Это является и главным препятствием, сильно усложняющим технологию кубитных цепочек, описанную выше и методом создания иной технологии «ключа», предложенной нами. Триплетный кислород (электронный спин S=1), встраиваясь в химическую связь между двумя атомами кремния, сначала преодолевает потенциальный барьер, чтобы произошла реакция [14]:



и последующая реакция

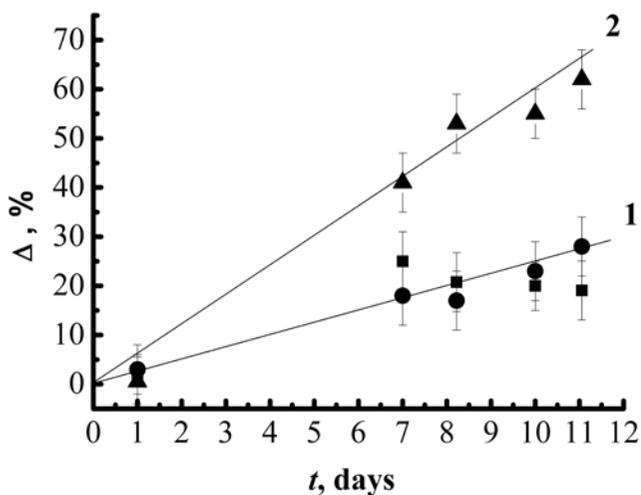


Но этот барьер оказывается не только энергетическим, но и «логическим», так как он зависит от взаимной ориентации спинов кремния в разорванной связи  $\equiv\text{Si-Si}\equiv$  и спина триплетного кислорода. Устойчивая связь Si-O образуется только в том случае, если пара Si• ..... SiO<sub>2</sub>• находится в триплетном состоянии (здесь и далее точками обозначены неспаренные электроны). Из синглетного состояния реакция запрещена принципом Паули, ставящим жесткий запрет на изменение полного спина пары с отсутствием внешнего поля. Какое отношение это имеет к процедуре считывание-запись в квантовом компьютере? Оказывается, состоянием электронных спинов пары Si• ..... SiO<sub>2</sub>• управляют ядерные спины, которые создают магнитное поле (сверхтонкое взаимодействие). Именно оно и переводит исходно синглетные пары в триплетное состояние, значительно ускоряя окисление кремния. На *рис. 3* показана зависимость доли изотопов кремния <sup>28</sup>Si, <sup>29</sup>Si и <sup>30</sup>Si, выбиваемых ионами In<sup>+</sup> при облучении ими поверхности кремния, от времени окисления кристаллов на воздухе в магнитном поле 0,17 Тл. Эффективность эмиссии этих ионов зависит от того, включены ли они в оксид или находятся в свободном химически не связанном состоянии. Поэтому *рис. 3* отражает кинетику окисления для разных типов изотопов.

Видно, что атомы с изотопом <sup>29</sup>Si участвуют в окислении почти вдвое чаще, чем немагнитные ядра <sup>28</sup>Si, <sup>30</sup>Si. Следовательно, дело не в массе, а в том, что у изотопа <sup>29</sup>Si имеется отличный от нуля спин. Именно он и управляет реакцией встраивания кислорода в связь  $\equiv\text{Si-Si}\equiv$ . Таким образом, ядерный спин «сообщает» электронным спинам о своей поляризации, приводя к вполне макроскопическому, легко регистрируемому эффекту локального окисления.

Из приведенных данных следует, что нанореактор в кристалле кремния, содержащий атом кислорода (вместо фосфора), способен во много раз эффективнее «читать» информацию, сохраненную в кремниевых кубитах, чем в предложенных ранее системах. Использование такой же цепочки магнитных ядер, как на *рис. 2 б*, позволит обнаруживать окисленные участки поверхности кремния в местах, где располагаются ядра <sup>29</sup>Si. Это и дает возможность

получить «мгновенную фотографию» состояния всех ядер кубита, которую можно считать просто атомно-силовым или электронным микроскопом. Хотя такое изображение нами еще не получено, первые шаги в этом направлении сделаны [15]. На *рис. 4* можно видеть изменение рельефа поверхности кремния в результате его экспозиции в магнитном поле. Этот рисунок говорит о том, что состояние магнитных ядер можно визуализировать. Возможность локального окисления кремния в местах расположения магнитных ядер – путь к визуализации мгновенного состояния всей ядерной системы спинов (кубитов). Получается, что спиновая химия магнитных изотопов предлагает метод фотографирования квантового штрих-кода на поверхности кристалла. Триплетный кислород играет роль, аналогичную «проявителю» в фотопроцессе.

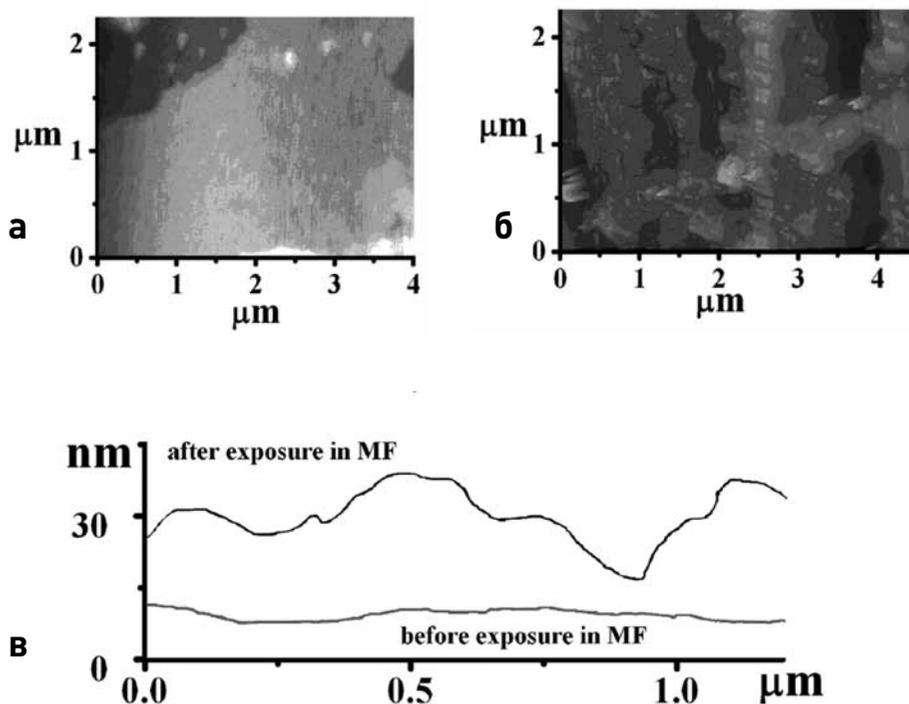


**Рис.3.** Зависимость доли изотопов 1-  $^{28}\text{Si}$  и  $^{30}\text{Si}$  (кружки и квадратики), 2 -  $^{29}\text{Si}$  (треугольники), выбиваемых из кристалла кремния первичными ионами  $\text{In}^+$ , от длительности окисления кристалла кремния в магнитном поле на воздухе

Принципиально иной путь создания спиновых кубитных цепочек – химический дизайн, т.е. создание молекул желаемой структуры, уложенных в кристаллическую решетку в определенном порядке. Сегодня известны десятки металл-органических соединений (молекулярных магнетиков), в которых электронные и ядерные спины располагаются в заданной геометрии (например, в цепочках) и взаимодействуют друг с другом желаемым образом (см., например, обзоры [16-19]). Это взаимодействие зависит от расстояния между спинами, но в металл-органических продуктах химического дизайна оно управляется еще и особыми цепочками атомов – обменными мостиками, через которые передается обменное взаимодействие, даже если расстояние между спинами велико (*рис. 5*). Поскольку группы атомов, передающие обменные взаимодействия, могут быть заменены и подобраны желаемым об-

разом (в этом заключается дизайн и инженерия таких цепочек), открывается возможность для подбора оптимальной величины спин-спиновых взаимодействий  $J_{\perp}$  и  $J_{\parallel}$  (рис. 5).

Молекулярная инженерия спиновая и изотопная обладает рядом преиму-



**Рис.4.**

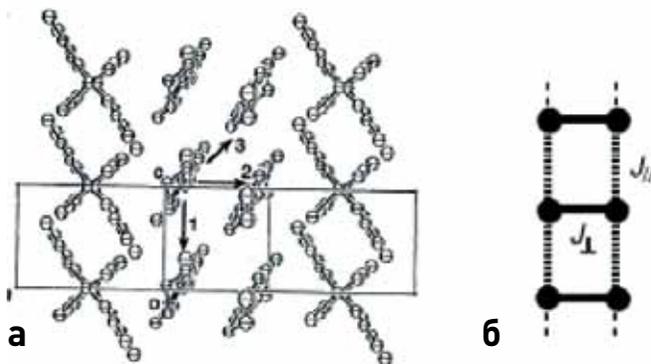
а) Поверхность кристалла кремния до экспозиции в магнитном поле,  
 б) поверхность кремния после экспозиции в магнитном поле 0,17 Тл,  
 в) сравнение рельефа поверхностей окисления кристалла в магнитном поле и в его отсутствие (по результатам измерения атомным силовым микроскопом) [15].

ществ по сравнению с полупроводниковой инженерией кубитов:

- дорогостоящие манипуляции с отдельными атомами заменяются искусством химического синтеза, выстраивающего ядерные и электронные спины в желаемые конфигурации (в том числе, в спиновые цепочки);
- времена спиновой релаксации в молекулярных магнетиках, как правило, на несколько порядков величины длиннее, чем в неорганических кристаллах;
- спин-спиновыми (обменными и дипольными) взаимодействиями можно управлять путем замены обменных мостиков.
- изменение продуктов химической реакции под действием магнитного поля изотопа значительно легче обнаруживается («считывается») по

сравнению с методами считывания информации с помощью ядерного и электронно-ядерного резонансов.

В заключение заметим, что аналогия между иероглифами (продуктом человеческого сознания) и квантовой памятью (объектом, способным суще-



**Рис.5.**

а) атомная структура спиновой лестницы, б) схема обменных взаимодействий  $J_{\perp}$   $J_{\parallel}$  между спинами лестницы.

ствовать вне сознания) нами выбрана не только потому, что кислород способен проявить рисунок на поверхности кристалла, задаваемый состоянием кубитов. Фантазия подсказывает, что принципы работы компьютера постепенно приближаются к неизвестным до сих пор принципам работы человеческого мозга.

## Литература:

1. Buchachenko A.L., *Phys J. Chem. B*, 117, 2231(2013).
2. Kojima T., Itoh K. M., Shiraki Y. *Appl. Phys. Lett.*, 83, 2318 (2003).
3. Abe E., Itoh K.M., Ladd T.D., Goldman J.R., Yamaguchi F., Yamamoto Y. *Phys. Rev. Lett.*, 89, 017901 (2002).
4. Itoh K.M. *Solid State Comm.*, 133, 747 (2005).
5. Ibano K., Itoh K.M., Uematsu M., *Appl J. Phys.*, 103, 026101 (2008).
6. Shimizu Y., Uematsu M., Itoh K.M. *Phys. Rev. Lett.*, 98, 095901 (2007).
7. Ladd T.D., Maryenko D., Yamamoto Y., Abe E., Itoh K.M. *Phys. Rev. B*, 71, 014401 (2005).
8. E.Abe, K. M. Itoh, J. Isoya, and S.Yamasaki, *Phys. Rev. B*, 70, 033204 (2004).
9. Sekiguchi T., Yoshida S., Shiren Y., Itoh K.M., Mysliveček J., Voigtländer B. *Appl. Phys.*, 101, 081702 (2007).
10. Verhulst A.S., Rau I.G., Yamamoto Y., Itoh K.M. *Phys. Rev. B*, 71, 235206 (2005).
11. Morishita H., Vlasenko L.S., Tanaka H., Semba K., Sawano K., Shiraki Y., Eto M., Itoh K.M. *Phys. Rev.*, B 80, 205206 (2009).
12. Коплак О.В., Моргунов Р.Б., Бучаченко А.Л. *Письма в ЖЭТФ*, 96, 2, 107 (2012).
13. Коплак О.В., Дмитриев А.И., Моргунов Р.Б. *Физика твердого тела*, 54, 1350 (2012).

14. *Koplak O., Morgunov R., Buchachenko A.* Chemical Physics Letters, 560, 29(2013).
15. *Koplak O.V., Dmitriev A.I., Kakeshita T., Morgunov R.B.* Journal of Applied Physics, 110 (4), 044905 (2011).
16. *Rovira C.* Chem.Eur.J., 6, 2010(1723).
17. *Бучаченко А.Л.* Успехи химии, 59, 529(1990).
18. *Buchachenko A.L.* Mol. Cryst. Liquid Cryst., 129, 314(1989).
19. *Molecular Magnetism / Itoh K., Kinoshita M., eds.* Tokyo: Kodansha, 2000.

# Реагент + катализатор = активирующий сорреагент

Н.В. Зык, Е.К. Белоглазкина, О.Б. Бондаренко, Р.Л. Антипин

**Зык Николай Васильевич**, доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией биологически активных органических соединений кафедры органической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

**Белоглазкина Елена Кимовна**, доктор химических наук, профессор кафедры органической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

**Антипин Роман Львович**, кандидат химических наук, старший преподаватель кафедры органической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

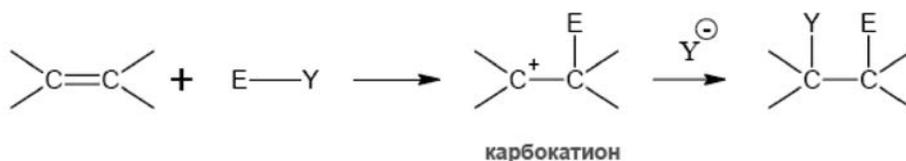
**Бондаренко Оксана Борисовна**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник кафедры органической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Проект РФФИ № 13-01-11501

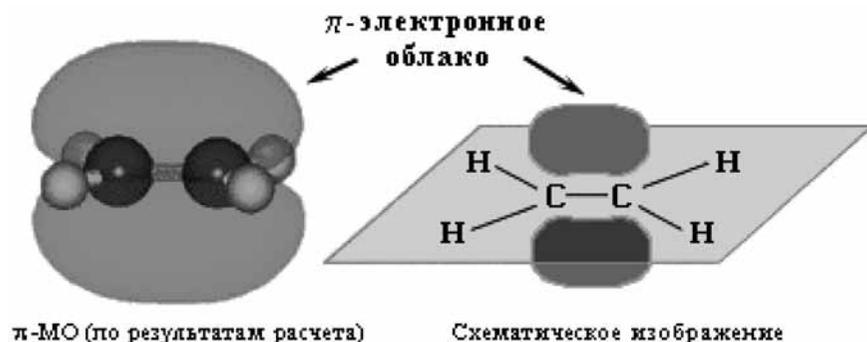
Основная задача синтетической органической химии - создание новых химических соединений. Физические, химические и биохимические свойства органического вещества (агрегатное состояние; растворимость; основность или кислотность; реакционная способность; биологическая активность) зависят от характера входящих в его состав атомов и атомных группировок. Поэтому разработка методов введения в органические молекулы различных функциональных групп (групп атомов, определяющих свойства и позволяющих относить соединение к тому или иному структурному химическому классу) всегда важна и актуальна.

С точки зрения функционализации органических молекул огромный интерес представляют реакции электрофильного присоединения к алкенам - соединениям, содержащим двойную связь между атомами углерода, - поскольку такие реакции позволяют ввести в молекулу сразу две функциональные группы - одинаковые или разные, в зависимости от выбранного реагента Е-У (**Рис. 1**).

Двойная С=С связь в молекулах алкенов получается за счет перекрывания вдоль линии связи С-С  $sp^2$ -гибридных орбиталей атомов углерода ( $\sigma$ -связь) и бокового перекрывания углеродных р-орбиталей



**Рис.1.** Общая схема реакции электрофильного присоединения к алкену.



**Рис.2.** Модель молекулы этилена, содержащей C=C-связь.

( $\pi$ -связь) с образованием двух электронных облаков над и под плоскостью молекулы (**Рис.2**). Эти облака являются донорами электронов, и поэтому молекулы алкенов способны реагировать с электрофильными реагентами.

Электрофильные реагенты – это частицы, которых в химических реакциях принимают электроны и образуют новые ковалентные связи за счет пары электронов партнера. К электрофилам относятся положительно заряженные ионы, например:



а также нейтральные молекулы, имеющие электронодефицитный центр:



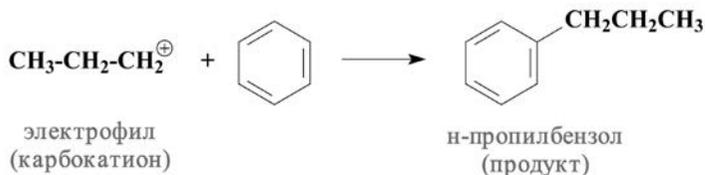
Процессы присоединения электрофилов по C=C связям (сокращенно AdE = *Addition Electrophilic*) протекают, как правило, в две элементарные стадии. Первой стадией реакции является разрыв π-связи в молекуле алкена с присоединением по месту разрыва электрофильной частицы и образованием карбокатиона, который затем реагирует с анионом Y, давая конечный продукт (**Рис. 1**).

Однако, к сожалению для химиков-синтетиков, не любое соединение E-Y способно присоединяться по связи C=C. Для того, чтобы первая стадия AdE реакции могла осуществиться, необходимо, чтобы связь между атомами E и Y реагента была поляризована – другими словами, общие электроны, образующие связь между этими атомами, должны быть смещены к одному из них, делая второй атом электронодефицитным (а значит электрофильным). Поляризации связи E-Y можно добиться, как вводя в реакцию молекулу, составленную из атомов разной электроотрицательности, так и смещая электроны связи под влиянием внешнего электрического поля, в том числе - создаваемого другой реагирующей частицей.

Последний подход, называемый катализом кислотами Льюиса, давно и широко используется в органической химии. В ходе реакции, катализируемой кислотой Льюиса, последняя взаимодействует со слабоэлектрофильным или вообще не проявляющим электрофильных свойств соединением E-Y, давая реакционноспособные поляризованные (а в пределе – ионные) интермедиаты. Пример такой реакции представлен на **Рис.2**.



**Стадия 1. Генерация электрофильного реагента из AlCl3 и н-пропилхлорида**



**Стадия 2. Генерация электрофильного реагента из AlCl3 и н-пропилхлорида**

**Рис.3.** Реакция н-пропилхлорида с бензолом, катализируемая кислотой Льюиса - хлоридом алюминия.

Заметим, что по принятому определению, катализатор - это химическое вещество, ускоряющее реакцию, но не входящее в состав продуктов реакции. В полном соответствии с таким определением, структурные фрагменты кислоты Льюиса отсутствуют в составе продукта на **Рис.3**.

В последние годы нами активно развивается новый подход к активации слабых электрофилов. Как и в вышеприведенном примере, он основан на действии на инертное в электрофильных реакциях соединение кислотой Льюиса, но кислотой Льюиса особого типа. Особенностью предложенного нами подхода является участие вещества-активатора на второй стадии AdE реакции в качестве донора анионной частицы. Таким образом, речь идет не о классическом катализе реакции электрофильного присоединения кислотой Льюиса, а об «активации-модификации» слабозлектрофильного реагента, и используемую кислоту Льюиса в данном случае правильнее называть не катализатором, а активирующим сореагентом.

В чем привлекательность такого подхода? Прежде всего, в том, что он очень сильно расширяет круг парных сочетаний фрагментов E-Y, вводимых по реакции на *Рис.1*. К настоящему времени мы научились вводить в молекулы алкены следующие структурные фрагменты (в любых сочетаниях):

E	Y
Cl-	-OSO <sub>2</sub> Cl
Br-	-OSO <sub>2</sub> OR
R-S-	-OSO <sub>2</sub> NR <sub>2</sub>
R-Se-	Cl
O=N-	Br
O <sub>2</sub> N	I

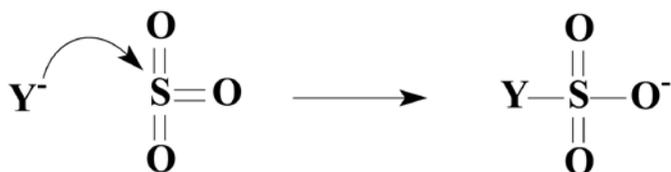
Все это разнообразие продуктов обеспечивает использование в качестве активирующих сореагентов двух «особых» типов кислот Льюиса – триоксида серы (SO<sub>3</sub>) и галогенидов и оксогалогенидов фосфора (POCl<sub>3</sub>, POBr<sub>3</sub>, PCI<sub>3</sub>, PBr<sub>3</sub>, PI<sub>3</sub>).

### Триоксид серы как активирующий сореагент в реакциях электрофильного присоединения

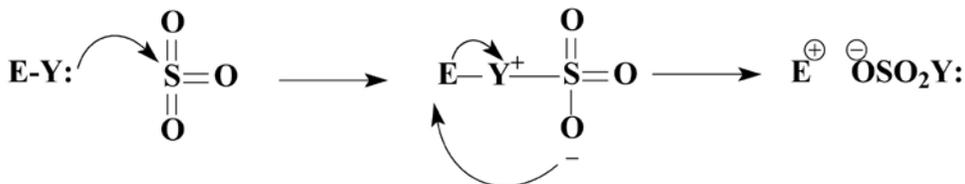
Имея высшую степень окисления атома серы (+6) и чрезвычайно высокую электроноакцепторность, SO<sub>3</sub> проявляет ярко выраженные качества кислоты Льюиса. Свойством, отличающим триоксид серы от «обычной» кислоты Льюиса, является то, что при его реакции с анионом Y- образуется новый анион Y-SO<sub>2</sub>-O-:

Это дает возможность завязывать ковалентную связь через атом кислорода, и, в частности, позволяет серному ангидриду внедряться по простым связям элемент-элемент. Такое внедрение приводит к образованию новых

высокоэлектрофильных реагентов, легко присоединяющихся по кратным углерод-углеродным связям.



На этой основе разработан принцип сульфонатной активации электрофильной реакционной способности [1-3], заключающийся в трансформации слабых электрофильных реагентов E-Y из слабых в сильные в результате превращения их в производные сульфокислот. Для реакций внедрения можно использовать как свободный серный ангидрид, так и его комплексы с ос-

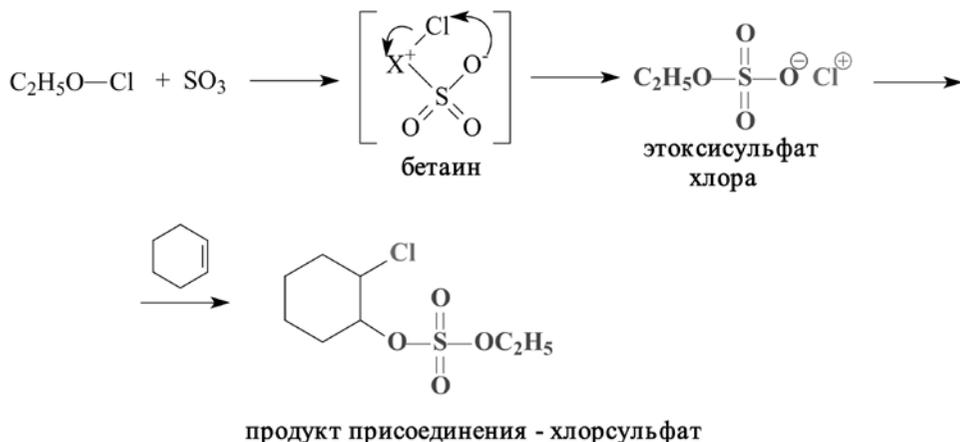


нованиями (например, аммиаком, аминами или диоксаном). Преимущество применения таких комплексов заключается в значительном упрощении экспериментального оформления синтеза.

Приведем несколько примеров сульфонатно-активированных электрофильных реакций.

Реакция триоксида серы с этилгипохлоритом  $C_2H_5O-Cl$ , неустойчивым малополярным соединением, которое само по себе неспособно присоединяться к алкенам, позволяет генерировать высокоэлектрофильный реагент этоксисульфат хлора (**Рис.3**). Внедрение серного ангидрида по связям  $Cl-O$  является результатом его координации по атому кислорода, приводящей к образованию промежуточной бетаиновой структуры, последующая перегруппировка которой сопровождается образованием этоксисульфата. Наличие в составе последнего сильно электроноакцепторной группы  $C_2H_5O-SO_2-O$  приводит к тому, что связь  $O-Cl$  оказывается существенно поляризованной, в результате чего атом хлора приобретает сильный положительный заряд и свойства, характерные для частицы  $Cl^+$ . Присоединение этоксисульфата хлора по двойной  $C=C$  алкена (циклогексена) связи дает продукт присоединения - хлорсульфат.

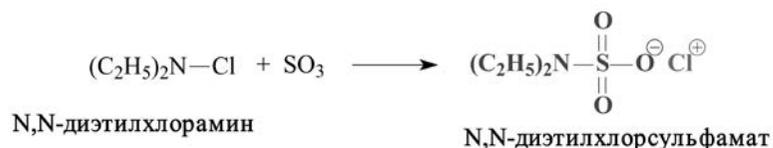
В результате реакций серного ангидрида с N-хлораминами происходит внедрение молекулы  $SO_3$  по связи  $N-Cl$  с образованием O-хлорсульфаматов (структура доказана методами ЯКР 35Cl и ЯМР 15N), которые также содержат гипохлоритный фрагмент  $O-Cl$ , обуславливающий высокую электрофильную хлорирующую способность этих соединений. Например, реакция N,N-диэтилхлорамина с  $SO_3$ , а затем с циклооктадиеном (**Рис. 4**), дает два



**Рис.4.** Присоединение этилгипохлорита к циклогексену с образованием хлорсульфата. Красным цветом показан электрофильный, синим - нуклеофильный фрагмент реагента – этоксисульфата хлора.

продукта присоединения, содержащих атомы хлора и сульфаматные группировки:

Несмотря на значительные выходы аддуктов, активация слабых электрофилов самим триоксидом серы имеет ряд недостатков: необходимость работы со свежеперегранным  $\text{SO}_3$  при очень низких (до  $-80^\circ\text{C}$ ) температурах, а также наличие в реакционной смеси кислых примесей, что может снижать устойчивость и выход продуктов. Этих осложнений можно избежать, если

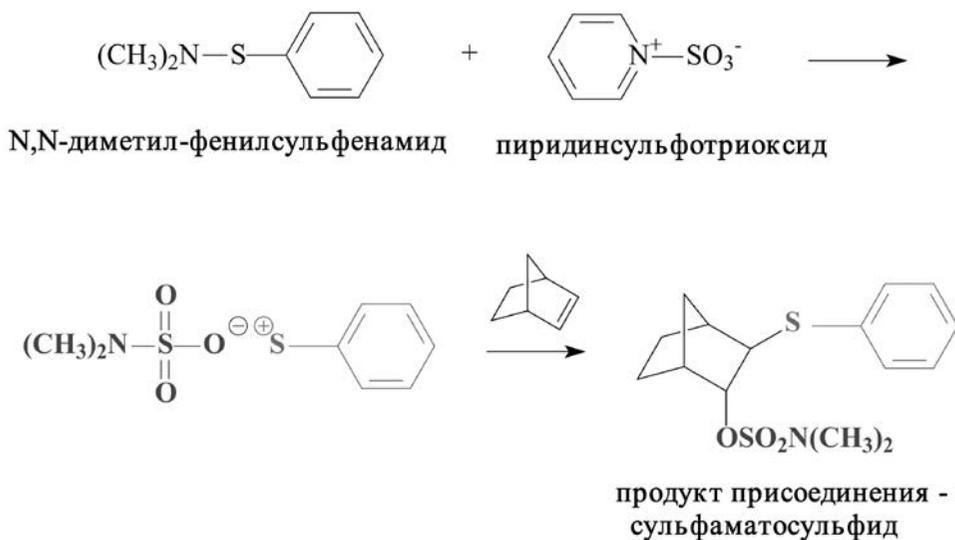


**Рис.5.** Присоединение N,N-диэтилхлорамина к циклооктадиену с образованием хлорсульфаматов. Красным цветом показан электрофильный, синим - нуклеофильный фрагмент реагента.

использовать комплексно связанный  $SO_3$ , например, пиридинсульфотриоксид. Сульфенамиды при взаимодействии с эквивалентными количествами пиридинсульфотриоксида и карбасного алкена норборнена образуют сульфаматосульфиды (*Рис. 6*):

### Активация слабых электрофилов галогенидами и оксогалогенидами фосфора и серы

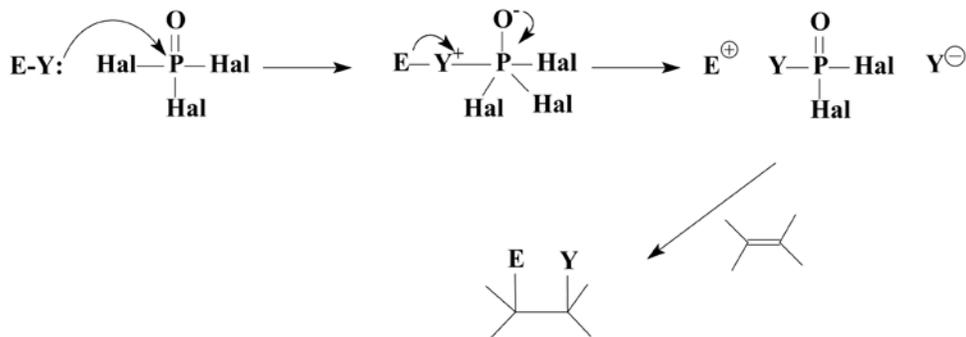
Галогениды и оксогалогениды фосфора – крупнотоннажные продукты химического производства, использующиеся в синтезе фосфорорганических пестицидов.



**Рис.6.** Присоединение N,N-диметилфенилсульфенамида к норборнену с образованием сульфаматосульфида. Красным цветом показан электрофильный, синим - нуклеофильный фрагмент реагента.

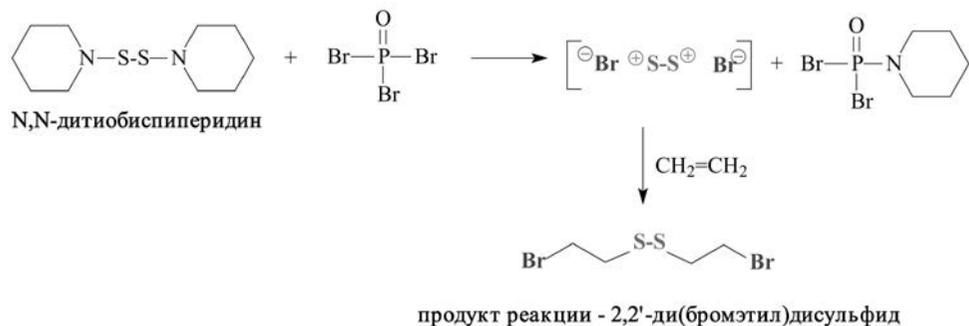
При взаимодействии слабого электрофила E-Y с оксогалогенидом (или галогенидом) фосфора вначале образуется цвиттер-ионный игремедиаат, распадающийся с образованиями ионных частиц E<sup>+</sup> и Y<sup>-</sup>. Первая из этих частиц – активнейший электрофил, реакция которого с алкенами даже при температуре -40°C протекает в течение нескольких секунд [4-6]:

Таким образом, активация слабых электрофилов оксогалогенидами и галогенидами фосфора и серы может служить общим методом стимулирования AdE реакций, применимым для повышения электрофильной реакционной способности. Например, присоединение N,N-дитиобисаминов к этилену в присутствии оксобромида фосфора протекает с высоким, почти количественным выходом продукта реакции - 2,2'-ди(бромэтил)дисульфида (*Рис. 7*).



Сульфенаты реагируют с норборненом в присутствии  $\text{PI}_3$ , образуя иодсодержащие сульфиды. Селененамиды, активированные  $\text{POBr}_3$  или  $\text{POCl}_3$ , дают галогенселениды сходной структуры (**Рис.8**).

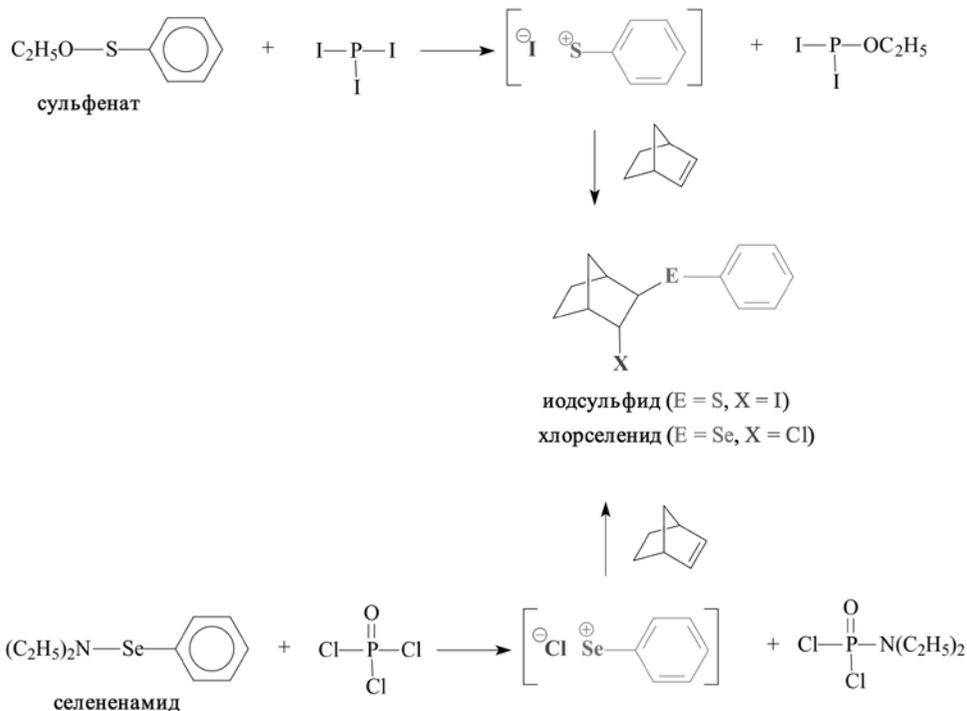
Очень интересен реагент, образующийся при активации оксобромидом фосфора N-хлораминов: в его реакциях с алкенами получают продукты присоединения по двойной связи смешанного галогена с необычной поляри-



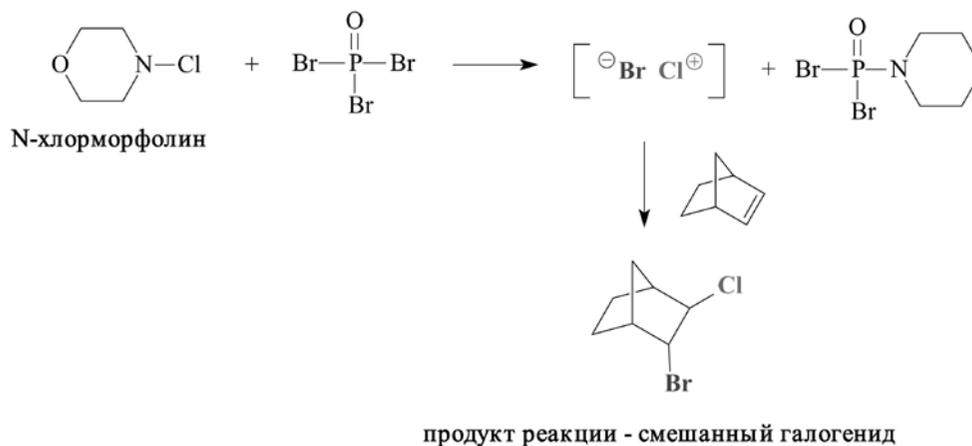
**Рис.7.** Присоединение N,N-дителиобиспиперидина к этилену в присутствии оксобромид фосфора с образованием с образованием 2,2'-ди(бромэтил)дисульфида.

зацией  $\text{Cl}^+\text{Br}^-$  (**Рис.8**). Необычность такого результата в том, что более электроотрицательный атом (хлор) в составе реагента заряжен положительно, а менее электроотрицательный бром – отрицательно, то есть распределение зарядов энергетически невыгодно, а значит, «противоестественно». Других реагентов такого типа до настоящего времени в химической литературе не описано.

Итак, мы предложили простой, удобный и универсальный метод синтеза замещенных сульфидов, селенидов, нитратов, нитритов, галогенидов с использованием в качестве активирующих слабые электрофилы сореагентов доступных неорганических соединений – триоксида серы и галогенсодержащих производных фосфора. Данные реакции существенно расширяют «ассортимент» известных электрофильных реагентов, позволяющих за одну стадию синтеза ввести в молекулу органического соединения сразу две различные функциональные группы.



**Рис.8.** Реакции с норборненом этилфенилсульфената, активированного иодидом фосфора, и N,N-диэтилфенилселененамида в присутствии оксохлорида фосфора.



**Рис.9.** Присоединение N-хлорморфолина к норборнену в присутствии оксобромиды фосфора с образованием в качестве электрофильного реагента смешанного галогена «ненормальной» полярности.

**Литература**

1. Зык Н.В., Белоглазкина Е.К., Зефирова Н.С. ЖОрХ. – 1995. – Т. 31, № 9. – С. 1283–1319.
2. Зык Н.В., Белоглазкина Е.К. и др. Изв. АН, Сер. хим. – 2002. – № 8. – С. 1356–1364.
3. Зык Н.В., Бондаренко О.Б. и др. Изв. АН, Сер. хим. – 2006. – № 10. – С. 1798–1799.
4. Zyk N.V., Beloglazkina E.K. et al. Phosphorus, Sulfur, 1998. – V. 5, № 4. – P. 107–122.
5. Антипин Р.Л., Зык Н.В., Белоглазкина Е.К. и др. ЖОрХ. – 2009. – Т. 45, № 6. – С. 857–862.
6. Зык Н.В., Белоглазкина Е.К. и др. Изв. АН, Сер. Хим. – 2011. – № 1. – С. 189–190.

# Когерентные и диссипативные пути фотосинтеза

В.В. Еремин, А.С. Белов, И.О. Глебов, В.В. Поддубный

**Вадим Владимирович Еремин,**  
доктор физико-математических наук, профессор химического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

**Александр Сергеевич Белов,**  
кандидат физико-математических наук, научный сотрудник химического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

**Илья Олегович Глебов,**  
кандидат физико-математических наук, старший преподаватель химического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

**Владимир Владимирович Поддубный,**  
студент химического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.  
Проект РФФИ № 13-03-11506

Одно из последних открытий в области изучения фотосинтеза связано с обнаружением долгоживущей когерентности процесса переноса энергии в фотоантеннах зеленых бактерий. Это открытие привело к идее о том, что когерентность увеличивает эффективность элементарных стадий фотосинтеза и тем самым является одним из факторов эволюции фотосинтезирующих организмов. Эта идея обсуждается в статье на примере двух типов элементарных процессов: переноса электронной энергии между хромофорами в фотоантеннах и переноса электрона в реакционных центрах бактерий.

Рассмотрены типы структур и общие свойства фотоантенн и реакционных центров. Показано, что в нативных фотосинтетических устройствах (ФСУ) нет когерентных состояний, но есть когерентные процессы. Отсутствие первых связано с тем, что ФСУ поглощают энергию от некогерентного источника – Солнца. В то же время, во многих экспериментах по изучению механизмов фотосинтеза используются когерентные источники света, которые создают в ФСУ когерентные состояния – это не влияет на эффективность переноса, но помогает понять его механизмы, в частности, отделить когерентные пути от диссипативных.

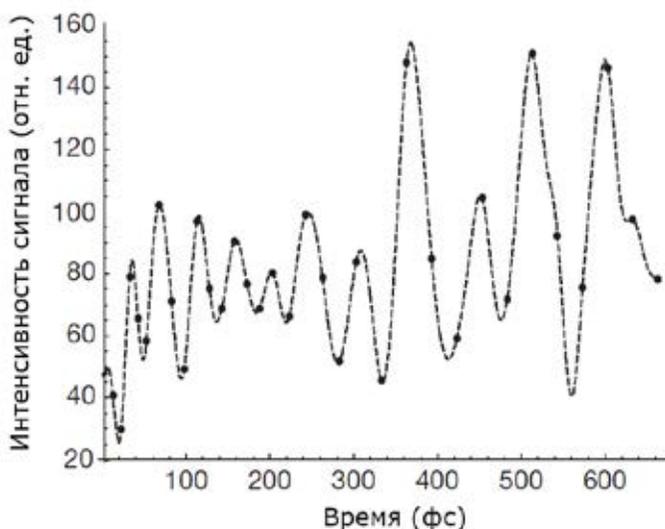
Кроме хромофоров, важнейшую роль в фотосинтезе играют белковые молекулы, которые выступают в роли

окружающей среды. Их взаимодействие с хромофорами приводит к диссипации электронной энергии и уничтожению когерентности. Используя простую модель переноса электрона в реакционных центрах пурпурных бактерий, мы показали, что в некоторых случаях диссипация представляет собой тонкую настройку состояний хромофоров, которая приводит к увеличению эффективности квантового транспорта (переноса) в фотосинтетических системах.

## Введение

Фотосинтез – один из самых сложных процессов, протекающих на Земле. Хотя его изучают более 100 лет [1] и уже известно очень многое о структуре, энергетике и динамике фотосинтетических систем, открытия в этой области не прекращаются. Исследователи пытаются понять, из чего состоят эти системы, как они устроены, какие физические и химические процессы в них протекают. Основная задача – не только понять замысел природы, но и извлечь из него уроки: выяснив, что именно делает отдельные стадии фотосинтеза такими эффективными, использовать те же принципы для создания искусственных систем аккумуляирования и преобразования солнечной энергии.

Современные экспериментальные и теоретические методы дают много новой информации о строении и механизмах функционирования фотосинтетических систем. Одно из последних открытий в этой области связано с обнаружением долгоживущей когерентности процесса переноса энергии в фотоантеннах зеленых бактерий [2]. Когерентность проявляется в квантовых биениях экспериментального сигнала, которые связаны с осцилляциями заселенности молекул, участвующих в переносе (*рис. 1*). Анализ этих данных привел к идее о том, что когерентность – неотъемлемое свойство фотосинтетических устройств, которое



**Рис.1.** Зависимость интенсивности сигнала фотонного эха от времени.

Точки – экспериментальные значения, пунктирная кривая – их интерполяция

увеличивает эффективность элементарных стадий фотосинтеза и тем самым является одним из факторов эволюции фотосинтезирующих организмов.

Последующая дискуссия и детальный анализ показали, что не все так однозначно и когерентность, скорее всего, не является конкурентным преимуществом одних организмов перед другими. Тем не менее, явления когерентного переноса и их конкуренты и антиподы – диссипативные процессы – играют важную роль в механизмах фотосинтеза. Этим явлениям и посвящена данная статья. Мы рассмотрим общие свойства фотосинтетических устройств, выделим общие черты в их строении, обсудим различные виды когерентности и покажем роль когерентности и диссипации энергии в процессах переноса энергии и переноса электрона в некоторых фотосинтетических организмах.

### Общие свойства фотосинтетических устройств

Несмотря на большое разнообразие фотосинтетических систем: от простейших бактерий до высших растений, – они обладают рядом общих, принципиальных свойств. Любое фотосинтетическое устройство (ФСУ) работает как преобразователь энергии (можно сказать, трансформатор) из световой в химическую форму по схеме:

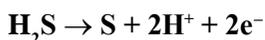
**световая → электронная → электрическая → химическая**

За каждую стрелочку в этой схеме отвечает своя часть ФСУ. Световую энергию улавливают фотоантенны – они поглощают свет и переходят в возбужденное электронное состояние. Это возбуждение передается от одного светочувствительного элемента антенны к другому до тех пор, пока не достигнет реакционного центра, где происходит перенос электрона от одного участка к другому и создается разность электрических потенциалов. В системе хранения энергии за счет разности потенциалов осуществляются самопроизвольные химические реакции, в которых образуются вещества, обладающие запасом химической энергии.

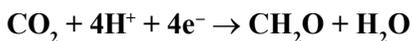
Все три компонента: фотоантенны, реакционный центр и система хранения энергии – являются общими для всех фотосинтетических организмов. Различия состоят в конкретном строении этих компонентов, механизмах их взаимодействия между собой, энергетике и временах фотосинтеза, а также собственно в химических превращениях. В простейших организмах – пурпурных бактериях – фотосинтез не приводит к окислительно-восстановительным превращениям, его основным результатом является синтез аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ), которая и является аккумулятором химической энергии:



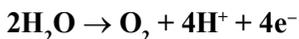
АТФ называют первичным продуктом фотосинтеза. Она образуется во всех ФСУ; в более сложных устройствах кроме этого возможны и окислительно-восстановительные реакции. Так, в зеленых серобактериях сероводород окисляется до серы:



а образовавшиеся при этом электроны и ионы водорода участвуют в восстановлении углекислого газа до углеводов (схематично –  $\text{CH}_2\text{O}$ ), которые, наряду с АТФ служат для хранения химической энергии:

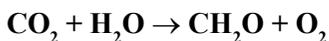


Процесс образования углеводов происходит и в самых сложных организмах – зеленых растениях, однако, в отличие от серобактерий, источником электронов и ионов водорода в них служит вода, а вместо серы образуется кислород:



Такой фотосинтез называют кислородным. Углеводы и кислород – конечные продукты кислородного фотосинтеза.

Несмотря на распространенное мнение о высокой эффективности фотосинтеза, доля световой энергии, перешедшей в химическую, невелика. Так, в зеленых растениях на 1 моль мономерного звена углеводов  $\text{CH}_2\text{O}$  запасается 480 кДж энергии, а поглощается около 1800 кДж энергии света, следовательно, эффективность конверсии составляет только 27%. Конечно, это значительно больше 10%, характерных для полупроводниковых солнечных батарей, но это всего лишь около одной четверти. Объясняется это тем, что достижения суммарного результата



необходимо пройти множество стадий, поэтому большая часть энергии расходуется на побочные химические реакции и явления переноса.

В то же время, эффективность отдельных стадий фотосинтеза очень велика и зачастую приближается к максимально возможному значению – единице. Физические механизмы, обеспечивающие такую эффективность природных систем, разнообразны и до конца не выяснены. Среди важнейших явлений, которые надо учитывать при анализе механизмов фотосинтеза, – когерентность переноса энергии и диссипация энергии. Для того чтобы понять их роль, рассмотрим общие черты в строении ФСУ.

### Структура фотоантенн и реакционных центров

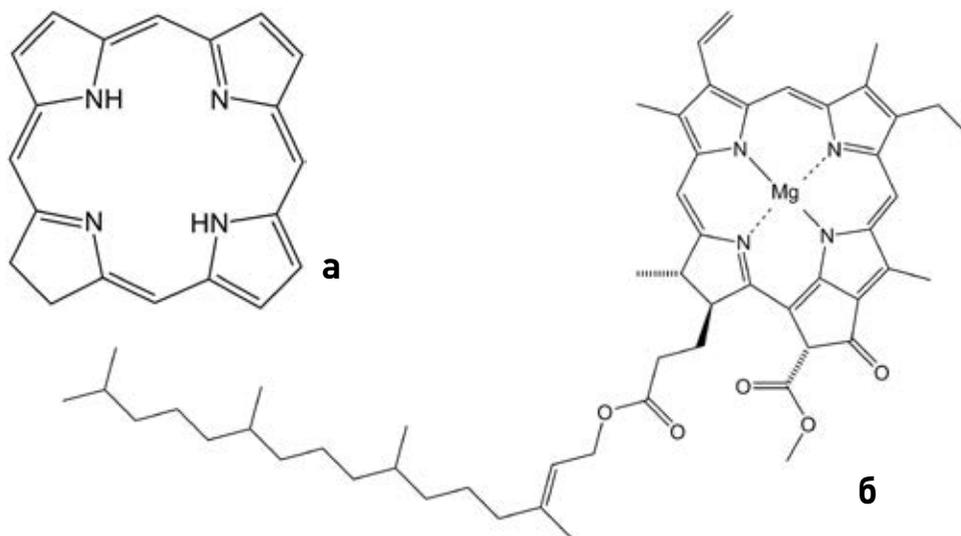
Когерентный перенос энергии и диссипация в элементарных стадиях фотосинтеза – это очень быстрые процессы, их характерные времена составляют от сотен фемтосекунд до десятков пикосекунд (1 фс=10<sup>-15</sup> с, 1 пс=10<sup>-12</sup> с): чтобы оценить их малость этих времен, заметим, что свет за такое время успевает пройти всего от нескольких микрон до нескольких миллиметров. В то же время, химические стадии фотосинтеза – сравнительно долгие, они могут занимать до нескольких секунд, поэтому их механизмы мы рассматривать не будем, а ограничимся фотоантеннами и реакционными центрами, где происходят сверхбыстрый перенос энергии и перенос электронов [3].

Основной структурной единицей всех фотоантенн и реакционных центров служат пигменты хлорофиллы (у бактерий – бактериохлорофиллы) – крупные

органические молекулы, содержащие хлориновую систему: четыре соединенных между собой пятичленных цикла с атомами азота (*рис. 2а*). Хлориновая система включает 10 сопряженных двойных связей, у бактериохлорофиллов число двойных связей в сопряженной системе на одну или две меньше. Именно сопряженная система электронов отвечает за поглощение света и взаимодействие пигментов между собой. Хлорофиллы и бактериохлорофиллы часто объединяют словом «хромофоры», которое обозначает молекулярные фрагменты, отвечающие за поглощение света и окраску соединения.

В центре хлориновой системы находится ион  $Mg^{2+}$ , связанный с каждым из четырех атомов азота (*рис. 2б*). Кроме того, магний имеет еще две свободные валентности и способен координироваться с аминокислотными остатками; эти связи участвуют в формировании структуры фотоантенны.

Различные виды хлорофиллов и бактериохлорофиллов отличаются между собой боковыми группами, благодаря которым они взаимодействуют с белковым окружением и тем самым играют структурную роль. Некоторые боковые группы также взаимодействуют с электронной системой и влияют на длину волны поглощаемого света, которая может изменяться у различных пигментов от 600 до 1050 нм [4].



**Рис.2.** а) Хлориновая система; б) структура хлорофилла а

Кроме хлорофиллов и бактериохлорофиллов, в состав фотосинтетических организмов входит еще ряд вспомогательных пигментов – каротиноидов. Эти пигменты поглощают свет на частотах, недоступных хлорофиллам, и передают им энергию возбуждения. Тем самым они участвуют в процессе аккумуляции солнечной энергии и увеличивают спектральный диапазон фотосинтетического устройства.

В природе имеется большое число различных структурных типов фотоантенн, в основе которых – сеть взаимодействующих между собой хромофоров. У простейших фотосинтетических организмов – пурпурных бактерий – фото-

антенны имеют симметричную структуру, однако в ходе эволюции эта структура усложнялась, и у высших растений, а также цианобактерий структура фотоантенн лишена симметрии.

Пурпурные бактерии содержат антенны нескольких типов, но все они имеют циклическую структуру. Антенна LH1 (LH обозначает *light harvesting* – аккумуляция света) непосредственно окружает реакционный центр и включает бактериохлорофиллы B875 (цифры обозначают длину волны максимума поглощения в нанометрах), тогда как антенны LH2, содержащие бактериохлорофиллы двух типов: B800 и B850, с реакционным центром не взаимодействуют (поэтому их называют периферийными), а передают ему энергию через антенны LH1 (*рис. 2*). В условиях низкой освещенности в бактериях могут появляться и вспомогательные периферийные антенны LH3 и LH4.

Бактерии другого цвета – зеленые – живут в условиях низкой освещенности, поэтому их фотосинтетическое устройство содержит очень большое – до 250 000 – число хромофоров, которыми служат различные виды бактериохлорофиллов и небольшая доля каротиноидов. Хромофоры организованы в крупные антенные комплексы – хлоросомы, которые имеют эллипсоидную форму с размерами в разных измерениях от 10 до 200 нм. В зеленых серобактериях перенос энергии от хлоросом к реакционному центру осуществляется через специальный пигмент-белковый комплекс, называемый ФМО-комплекс (по первым буквам фамилий его первооткрывателей – Фенны, Метьюса, Олсона). В отличие от хлоросом, этот комплекс устроен достаточно просто. Так, у бактерии *Prosthecochloris aestuarii* он представляет собой тример, состоящий из трех идентичных фрагментов, в каждом из которых находится 7 бактериохлорофиллов а (*рис. 1 цветной вкладки*).

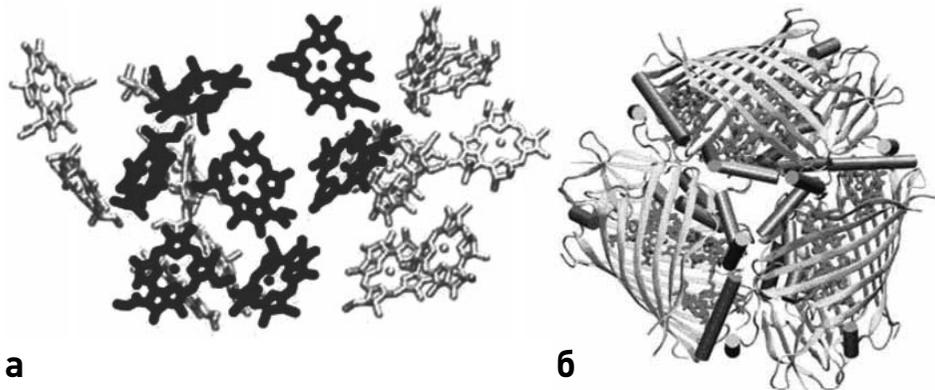
У цианобактерий и высших растений фотоантенны устроены более сложно. Независимо от конкретной структуры, все фотоантенны обладают общими свойствами:

- 1) они имеют иерархическую структуру, то есть состоят из нескольких фрагментов: например, LH1 и LH2 в пурпурных бактериях или хлоросом и комплексов ФМО в зеленых бактериях;
- 2) внутри каждого отдельного фрагмента хромофоры расположены довольно плотно, поэтому взаимодействие между ними сильное, и энергия переходит от одного хромофора к другому очень быстро (за время порядка одной пикосекунды). Взаимодействие между фрагментами фотоантенны – более слабое, поэтому процесс переноса энергии занимает более длительное время (десятки пикосекунд);
- 3) основная задача всех фотоантенн – собрать световую энергию и за оптимальное время (не очень быстро и не очень медленно) передать ее в достаточном количестве в реакционный центр, где за счет этой энергии происходит перенос электрона и появляется электрический потенциал в состоянии с разделенными зарядами. Реакционные центры (РЦ) разных фотосинтетических устройств, в отличие от фотоантенн, устроены примерно похожим образом, различаясь лишь деталями. Рассмотрим это устройство на примере пурпурных бактерий.

РЦ состоит из пары связанных бактериохлорофиллов (ее называют специальной парой), двух бактериохлорофиллов, двух бактериофеофитинов (они от-

личаются от бактериохлорофиллов отсутствием иона магния), хинонов и иона железа (рис. 3). Эти молекулы в РЦ образуют симметричную структуру с осью симметрии, проходящей через центр специальной пары и ион железа. Донором электрона служит специальная пара (после ее перехода в электронно-возбужденное состояние), конечным акцептором – один из хинонов. Благодаря симметрии РЦ возможны две ветви переноса – их называют А и В. Практически, однако, в переносе задействована только ветвь А, ее называют активной, а ветвь В играет роль запасной [7]. Причины такой селективности пока до конца не ясны.

Молекулы хромофоров, участвующие в переносе энергии и переносе электрона, не висят в воздухе – они погружены в белковую среду (рис. 3б, рис. 4), которая непосредственно в переносе не участвует, но жизненно не-



**Рис.3.** Структура ФМО комплекса бактерии *Prosthecochloris aestuarii*. а) Относительное расположение хромофоров (жирным выделены хромофоры одного из трех фрагментов); б) хромофоры в белковом окружении (ленты изображают складчатую, а цилиндры – спиральную структуру белка) [6]

обходима фотосинтетическим организмам для осуществления их функций. Аминокислотные остатки белка образуют химические связи с хромофорами, объединяя их в единую супрамолекулярную структуру и выполняя тем самым структурообразующую роль. Кроме того, белок служит для хромофоров тепловым окружением («термостатом»), взаимодействие с которым способствует тонкой настройке электронных свойств хромофоров и облегчает перенос энергии и электрона. Белковое окружение способно воспринимать часть энергии электронно-возбужденных хромофоров и способствовать их переходу в равновесное состояние. Именно взаимосвязь и конкуренция различных взаимодействий – хромофоров между собой и хромофоров с белковым окружением – определяют свойства процессов переноса, их скорость, эффективность и характер (когерентный или диссипативный).

### Когерентность и диссипация

*Когерентность* в широком смысле слова – это явление согласованности (корреляции) между состояниями или процессами. В основе квантовой когерентности лежит явление интерференции между состояниями системы.

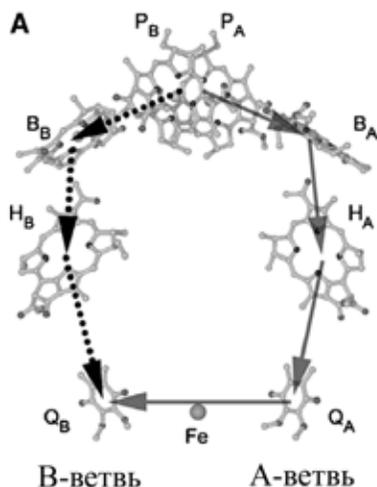
Рассмотрим простой пример: представим, что молекула вещества может находиться в двух состояниях с энергиями  $E_1$  и  $E_2$  и вероятностями  $p_1$  и  $p_2$ . Пусть в состоянии 1 интенсивность поглощенного молекулой света равна  $I_1$ , а в состоянии 2 –  $I_2$ . В случае некогерентного возбуждения данного вещества молекулы в разных состояниях будут поглощать свет независимо друг от друга и суммарная интенсивность поглощенного света составит:

$$I_{\text{некогер}} = p_1 I_1 + p_2 I_2$$

Такое состояние вещества называют статистической смесью.

При возбуждении суперпозиции состояний 1 и 2, например, когерентным источником света – лазерным импульсом, интенсивность поглощенного света будет зависеть от времени, и эта зависимость будет иметь характер колебаний с частотой  $\omega_{12} = E_2 - E_1 / \hbar$ :

$$I_{\text{когер}(t)} = p_1 I_1 + p_2 I_2 + I \cos(\omega_{12} t)$$



**Рис.4.** Структура реакционного центра пурпурной бактерии *Rhodospirillum rubrum*. Показаны только молекулы, участвующие в переносе электрона. Стрелками указаны возможные направления переноса (сплошными – по активной ветви, пунктирными – по запасной). Р и В – бактериохлорофиллы, Н – бактериофеофитин, Q – убикинон

Последнее слагаемое описывает интерференцию между состояниями 1 и 2. В зависимости от времени эта интерференция может быть конструктивной или деструктивной, то есть, интенсивность поглощения будет больше или меньше, чем в некогерентном случае.

Когерентность – деликатное свойство, она может существовать только в отсутствие внешних воздействий. В реальных молекулярных системах взаимодействие когерентной системы с окружающей средой в конце концов приводит к равновесному состоянию и уничтожению когерентности. В фотосинтетических устройствах это происходит благодаря диссипации – рассеянию избыточной электронной энергии хромофоров в окружающий их белок. Таким образом, когерентные состояния обладают конечным временем жизни, которое зависит от интенсивности взаимодействия молекул с

окружающей средой – чем сильнее взаимодействие, тем короче время жизни когерентного состояния.

Название нашей статьи говорит о том, что когерентными бывают не только состояния, но и процессы, например, перенос энергии или электрона. Если процесс протекает с сохранением когерентности состояния, его называют когерентным. Это возможно, только если время процесса не превышает времени жизни когерентности состояния.

В зависимости от пространственного расположения хромофоров и энергии взаимодействия между ними перенос энергии может быть как некогерентным, так и когерентным. В первом случае взаимодействие между молекулами мало и в каждый момент времени в возбужденном состоянии находится только один хромофор. Передавая энергию соседней молекуле, он возвращается в основное электронное состояние. Такой механизм называют некогерентным переносом энергии по Фёрстеру. Некогерентность означает, что в процессе переноса в каждый момент времени участвуют только два хромофора, и между разными актами переноса нет никакой корреляции.

При сильном взаимодействии хромофоров электронное возбуждение может охватывать сразу несколько молекул – в этом случае говорят об экситонном механизме переноса (экситон – это коллективное возбуждение), который имеет когерентный характер.

В качестве примера рассмотрим процессы переноса энергии в фотоантеннах пурпурных бактерий (таблица 1). Быстрее всего происходит перенос энергии от каротиноидов к бактериохлорофиллам, и между бактериохлорофиллами В850, образующими основное кольцо фотоантенн LH1 и LH2. Оба процесса – когерентные, остальные происходят по механизму Фёрстера.

**Таблица 1.**  
**Характеристики различных стадий переноса энергии [3]**

Переход	Энергия взаимодействия, см <sup>-1</sup>	Время переноса, фс	Механизм
каротиноид – В850	300	200	экситонный
В850 – В850 в LH2 и LH1	500	100	экситонный
В800 – В800 в LH2	25	500-1000	Фёрстера
В800 – В850 в LH2	30	2000	Фёрстера
LH2 – LH1	?	8000	Фёрстера
LH1 – RC	?	16000	Фёрстера

Первичный перенос электрона от специальной пары к бактериохлорофиллу в реакционных центрах пурпурных бактерий объединяет свойства когерентного и некогерентного процесса. На начальном этапе когерентность сохраняется, что видно в наличии биений в зависимости сигнала от времени (*рис. 5*), однако затем взаимодействие хромофором с белком приводит к потере когерентности и процесс переноса приобретает монотонный, диссипативный характер.

## Влияет ли когерентность на эффективность фотосинтеза?

Дискуссия о роли когерентности в первичных стадиях фотосинтеза разгорелась несколько лет назад, когда с помощью новой экспериментальной методики – двумерной импульсной электронной спектроскопии с преобразованием Фурье (спектроскопии фотонного эха) – было обнаружено, что квантовая когерентность при переносе энергии в комплексе ФМО сохраняется неожиданно долго – в течение 660 фс при температуре жидкого азота 77 К [2]. Аналогичные измерения с отдельным бактериохлорофиллом в растворе, то есть, вне антенны, показали отсутствие характерных для комплекса биений в зависимости сигнала от времени [10]. Тем самым было доказано, что наблюдаемая в комплексе ФМО когерентность присуща не отдельному хромофору, а вызвана их когерентным взаимодействием между собой.

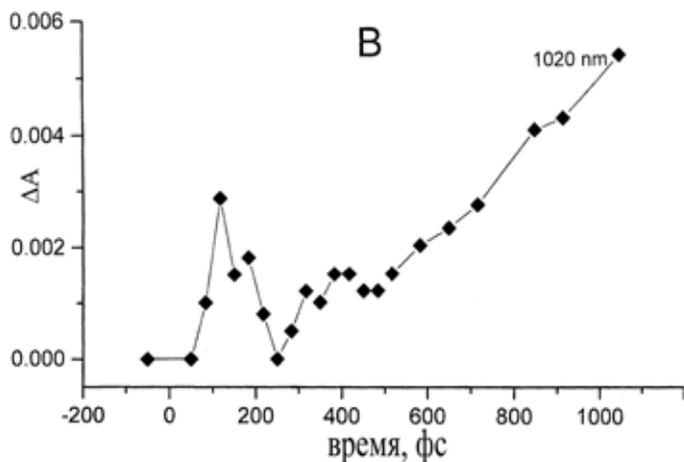
Последующие исследования привели к обнаружению долгоживущей когерентности и в других ФСУ – реакционном центре пурпурных бактерий [11], фотоантеннах LH2 пурпурных бактерий [12] и зеленых растений [13]. Более того, оказалось, что эта когерентность сохраняется и при комнатной температуре, правда, в течение более короткого времени, например 300 фс [14] против 660 фс при 77 К в комплексе ФМО. Последний факт и заставил предположить, что когерентность оказывается существенной для переноса энергии в фотосинтетических устройствах и поэтому является одним из факторов эволюционного развития этих организмов. Последняя часть этого утверждения сразу встретила естественное возражение: все эксперименты, в которых был обнаружен когерентный перенос энергии, использовали возбуждение фотосинтетического устройства когерентным источником света – лазерным импульсом, тогда как в естественных условиях солнечное излучение когерентным не является, поэтому когерентность переноса не может быть фактором эволюции.

Хотя факт положительного влияния когерентной динамики на эффективность переноса энергии можно считать установленным, вопрос о механизмах этого влияния остается открытым. Первоначально появилась идея о том, что квантовая когерентность помогает фотоантеннам ускорить поиск конечного состояния с наименьшей энергией в процессе, аналогичном алгоритму квантового поиска Гровера [15, 16]. Эта идея привела к ряду необоснованных громких утверждений, например, о том, что «бактерия выполняет роль квантового компьютера». Однако затем было показано, что структура комплекса ФМО не удовлетворяет условиям, необходимым в алгоритме Гровера [17].

Вместо квантового поиска был предложен ряд других квантовых механизмов, которые учитывают роль белкового окружения [17], в частности, ENAQT (Environmentally-Assisted Quantum Transport) – квантовый транспорт при поддержке окружающей среды [18]. В рамках моделей, основанных на ENAQT, для комплекса ФМО был получен интересный результат – эффективность переноса энергии в этом комплексе имеет необычную зависимость от температуры [19]. При низких температурах деструктивная интерференция квантовых путей переноса приводит к локализации возбуждения и уменьшению эффективности, при высоких температурах аналогичный эффект достигается путем уничтожения когерентности за счет взаимодействия хромофоров с

белковым окружением. Оптимальной является промежуточная температура 290 К, близкая к физиологической для зеленых серобактерий: при этой температуре деструктивная когерентность уничтожается белком, а конструктивная сохраняется. Поэтому частично когерентный перенос оказывается более эффективным, чем полностью когерентный или полностью некогерентный.

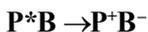
Этот результат показывает, что белковое окружение в природных фотосинтетических устройствах может играть не только структурную и диссипатив-



**Рис.5.** Временной спектр поглощения продукта первичного переноса электрона в реакционном центре пурпурной бактерии. Когерентность переноса сохраняется в течение 500 фс [9]

ную роль, но и конструктивную, увеличивая эффективность переноса энергии путем тонкого влияния на интерференцию квантовых путей процесса.

Мы можем продемонстрировать это на примере переноса электрона в реакционном центре пурпурных бактерий от специальной пары Р к бактериохлорофиллу В по ветви А (*рис. 5*):



где звездочка обозначает электронное возбуждение. Для этого процесса мы построили одномерную модель, в которой электронные состояния системы до и после разделения заряда ( $P^*B$  и  $P^+B^-$ ) представляются гармоническими осцилляторами [20]. Исходное состояние  $P^*B$  считается чисто когерентным. Для изучения влияния диссипации на эффективность переноса электрона мы варьировали интенсивность взаимодействия продукта реакции  $P^+B^-$  с белковым окружением. На (*рис.2 цветной вкладки*), представлены зависимости заселенности продукта от времени при различных значениях интенсивности взаимодействия. Изображены кривые для сильного, слабого и нулевого взаимодействия; последняя соответствует отсутствию диссипации и чисто когерентному движению.

На рисунке видно, что во всех случаях процесс имеет ступенчатый характер, что соответствует постепенному накоплению продукта реакции. В отсутствие диссипации на кривой накопления продукта (точечная линия) отчетливо видна колебательная структура, характеризующая чисто когерентный перенос электрона. При увеличении диссипации энергии хромофоров в белковое окружение уменьшается высота всех «ступенек» на кривых заселенности, то есть локальная вероятность переноса электрона падает. При этом, несмотря на то, что локальные максимумы заселенности выше для когерентного движения, при больших временах выход реакции, то есть эффективность переноса электрона тем больше, чем сильнее взаимодействие конечного состояния с белком [21].

Это объясняется тем, что чисто когерентный перенос электрона между двумя состояниями является обратимым: наряду с процессом разделения зарядов становится возможным и обратный процесс – их рекомбинация. При увеличении взаимодействия с белком и уменьшения степени когерентности переноса электрона вероятность обоих процессов уменьшается, однако снижение вероятности прямого перехода не так заметно, как обратного, т.е. «полезная» когерентность (прямая реакция) затухает чуть медленнее, чем «деструктивная» (обратная реакция). Этот факт дает основание полагать, что в биологических системах за счет диссипации возможен механизм селективного затухания именно деструктивной когерентности, то есть белковое окружение, благодаря своему сложному строению и разнообразию функциональных групп может распознавать различные типы когерентности, оставляя только полезные.

В дальнейшем мы планируем подтвердить этот вывод и распространить его на другие процессы в фотосинтетических устройствах.

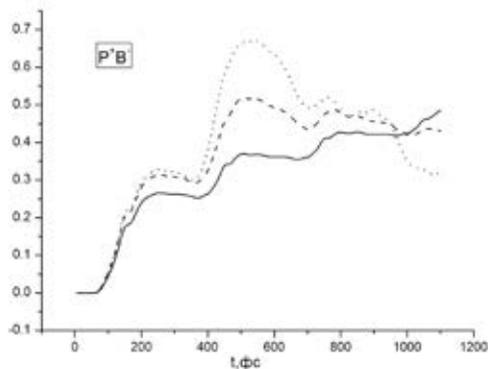
В рамках этой же модели мы также изучили влияние степени когерентности исходного состояния  $P^*B$  на эффективность переноса электрона. Эта проблема связана с тем, что в природных ФСУ все возбужденные состояния являются некогерентными, так как формируются под действием некогерентного солнечного излучения. В то же время, для изучения механизмов фотосинтеза, в частности, его самых быстрых стадий используют когерентные источники света – импульсные лазеры, которые создают чисто когерентные состояния. На примере первичного переноса электрона мы показали, что когерентность исходного состояния оказывает влияние на скорость и эффективность переноса электрона лишь при малых временах, до 300 фс. Усредненная по большому промежутку времени эффективность переноса практически не зависит от степени когерентности исходного состояния.

## Заключение

Проведенное обсуждение позволяет утверждать, что когерентность действительно играет важную роль в элементарных стадиях фотосинтеза, но это – когерентность процессов (путей), а не когерентность состояний. Элементарные процессы, протекающие за время, сравнимое с временем жизни когерентности состояний, обеспечивают быстрый и эффективный перенос энергии и электронов в фотосинтетических циклах. Самых когерентных состояний в фотосинтетических устройствах нет, так как энергия к ним приходит от некогерентного источника – Солнца. В то же время, во многих экспериментах по изучению механизмов фотосинтеза используются когерентные источники света, которые

создают в ФСУ когерентные состояния – это не влияет на эффективность переноса, но помогает понять его механизмы, в частности, отделить когерентные пути от некогерентных.

Когерентность состояний и процессов переноса в ФСУ связана, в первую очередь, со строением систем хромофоров и их взаимодействием между собой. Кроме хромофоров, важнейшую роль в фотосинтезе играют белковые молекулы, которые выступают в роли окружающей среды. Их взаимодействие с хромофорами приводит к ненужному, на первый взгляд, эффекту – диссипации



**Рис.6.** Зависимость от времени заселенности состояния с разделенными зарядами P+V- при различной интенсивности взаимодействия с белком. Сильное взаимодействие – сплошная линия, слабое – пунктирная, отсутствие взаимодействия (чисто когерентное движение) – точечная [21]

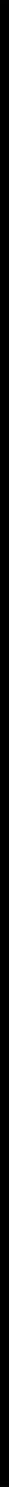
электронной энергии хромофоров, то есть рассеянию ее по колебаниям белка, фактически потере энергии и уничтожению когерентности. Однако теоретические исследования показывают, что такая диссипация на самом деле представляет собой тонкую настройку, которая уменьшает вероятности конкурирующих процессов и тем самым увеличивает эффективность квантового транспорта (переноса) в биохимических системах.

Эти результаты представляют интерес с точки зрения создания искусственных фотосинтетических устройств. Перспективы здесь выглядят скорее пессимистическими. Если собрать вместе систему сильно взаимодействующих между собой хромофоров и обеспечить когерентный перенос энергии при современном развитии техники органического синтеза не так уж трудно [8], то обеспечить такой системе хорошо настроенное белковое окружение пока не представляется возможным. Это говорит о том, что подражание природе (биомиметика) не является самым перспективным направлением в области преобразования солнечной энергии.

## Литература

1. Ciamician G. The photochemistry of the future. – Science. – 1912. – V. 36. – P. 385–394.
2. Engel G.S., Calhoun T.R., Read E.L., Ahn T.-K., Mančal T., Cheng Y.-C., Blankenship R.E., Fleming G.R. Evidence for wavelike energy transfer through quantum coherence in photosynthetic systems. – Nature. – 2007. – V. 446. – P. 782–786.
3. Еремин В.В. С чего начинается фотосинтез? – Природа. – 2008. – № 12. – С. 3–12.
4. Blankenship R.E. Molecular mechanisms of photosynthesis. – Blackwell Science. – London, 2009. – 321 p.

5. Ritz T., Park S., Schulten K. Kinetics of excitation migration and trapping in the photosynthetic unit of purple bacteria. – *J. Phys. Chem. B.* – 2001. – V. 105. – P. 8259–8267.
6. Cheng Y.-C., Fleming G.R. Dynamics of light harvesting in photosynthesis. – *Annu. Rev. Phys. Chem.* – 2009. – V. 60. – P. 241–262.
7. Frolow D., Wakeham M.C. *et al.* Investigation of B-branch electron transfer by femtosecond time-resolved spectroscopy in a Rhodospirillum rubrum reaction centre that lacks the QA ubiquinone // *Biochim. Biophys. – Acta.* – 2005. – V. 1707. – P. 189–198.
8. Еремин В.В., Белов А.С. Структура и свойства фотосинтетических антенн: природные и искусственные комплексы. – *Успехи химии.* – 2012. – Т. 81. – С. 662–674.
9. Yakovlev A.G., Shkuropatov A.Y., Shivalov V.A. Nuclear wavepacket motion producing a reversible charge separation in bacterial reaction centers. – *FEBS Lett.*, 2000. – V. 466. – P. 209–212.
10. Fransted K.A., Caram J.R., Hayes D., Engel G.S. Two-dimensional electronic spectroscopy of bacteriochlorophyll a in solution: Elucidating the coherence dynamics of the Fenna-Matthews-Olson complex using its chromophore as a control. – *J. Chem. Phys.* – 2012. – V. 137, 125101.
11. Lee H., Cheng Y.-C., Fleming G.R. Coherence dynamics in photosynthesis: protein protection of excitonic coherence. – *Science.* – 2007. – V. 316. – P. 1462–1465.
12. Harel E., Engel G.S. Quantum coherence spectroscopy reveals complex dynamics in bacterial light-harvesting complex 2 (LH2). – *Proc. Natl. Acad. Sci.* – 2012. – V. 109. – P. 706–711.
13. Callhoun T.R., Ginsberg N.S., Schlau-Cohen G.S., Cheng Y.-C., Ballottari M., Bassi R., Fleming G.R. Quantum coherence enabled determination of the energy landscape in light-harvesting complex II. – *J. Phys. Chem. B.* – 2009. – V. 113. – P. 16291–16295.
14. Panitchayangkoon G., Hayes D., Fransted K.A., Caram J.R., Harel E., Wen J., Blankenship R.E., Engel G.S. Long-lived quantum coherence in photosynthetic complexes at physiological temperature. – *Proc. Natl. Acad. Sci.* – 2010. – V. 107. – P. 12766–12770.
15. Ishizaki A., Fleming G.R. Quantum coherence in photosynthetic light harvesting. – *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* – 2012. – V. 3. – P. 333–361.
16. Grover L.K. Quantum mechanics helps in searching for a needle in a haystack. – *Phys. Rev. Lett.*, – 1997. – V. 79. – P. 325–328.
17. Mohseni M., Rebentrost P., Lloyd S., Aspuru-Guzik A. Environment-assisted quantum walks in photosynthetic energy transfer. – *J. Chem. Phys.* – 2008. – V. 129, 174106.
18. Kassal I., Aspuru-Guzik A. Environment-assisted quantum transport in ordered systems. – *New J. Phys.* – 2012. – V. 14, 053041.
19. Rebentrost P., Mohseni M., Kassal I., Lloyd S., Aspuru-Guzik A. Environment-assisted quantum transport. – *New J. Phys.* – 2009. – V. 11, 033003.
20. Глебов И.О., Еремин В.В. Влияние диссипации на колебательную динамику в системе двух взаимодействующих электронных состояний. – *Ж. физ. химии.* – 2008. – Т. 82. – С. 684–689.
21. Еремин В.В., Глебов И.О., Поддубный В.В. Роль когерентности в явлениях переноса электрона в природных биохимических наносистемах. – *Наносистемы: физика, химия, математика,* – 2013. – Т. 4, № 1. – С. 130–138.



**БИОЛОГИЯ И  
МЕДИЦИНСКИЕ  
НАУКИ**

# Считаем до двух: число семядолей у гидателловых – необычных родственников кувшинок

М.В. Ремизова

*Ремизова Маргарита Васильевна, кандидат биологических наук, ассистент кафедры высших растений биологического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова. Исполнитель проектов 12-04-01070, 09-04-01155, 06-04-48113.*

## **Семядоли, их число и функции**

Под семядолями обычно понимают первые листья растения, формирующиеся еще у зародыша в семени и становящиеся затем первыми листьями проростка. Необходимо отметить, что по форме и даже выполняемым функциям семядоли могут отличаться от остальных листьев растения. У части растений при прорастании семени семядоли оказываются над поверхностью субстрата и фотосинтезируют, как и все остальные формирующиеся вслед за ними листья. Такое прорастание семени получило название надземного. У растений с подземным прорастанием семядоли остаются под поверхностью субстрата, и первые надземные листья, таким образом, семядолями не являются. Сами семядоли в силу того, что оказались под землей, не могут фотосинтезировать. Их функция состоит в передаче питательных веществ растущему проростку. Если запасные вещества находятся в тканях самого семени, то семядоли функционируют как гаустории – перекачивают вещества в остальные части

растения. У некоторых растений (например, у бобовых и тыквенных) запасные вещества находятся непосредственно в семядолях, поэтому функция по их передаче проростку существенно упрощается. У некоторых растений семядоли могут выполнять как фотосинтезирующую, так и гаусториальную функции. Семядоли проростка или их часть в этом случае находятся над землей, а семя, из которого проросток развился, может находиться как над, так и под землей. Гаусториальную функцию в любом случае выполняет верхушка семядоли.

По числу семядолей традиционно выделяют однодольные и двудольные растения. Помимо числа семядолей это разделение поддержано и другими признаками – строением цветков, листьев, анатомией стеблей и корней. При этом считается (и молекулярно-филогенетические данные, основанные на анализе нескольких участков ДНК, это подтверждают), что однодольные растения произошли от двудольных [26]. Так как из-за этого двудольные растения оказываются парафилетической группой, есть сильная тенденция вообще отказаться от выделения двудольных как класса покрытосеменных растений (например, APG III, 2009). Но это вопрос терминологии. Самое интересное, что не все двудольные растения имеют две семядоли. В разных семействах двудольных растений спорадически возникают односемядольные зародыши, которые иногда называют ложноодносемядольными [6]. У разных таких растений становление «однодольности» происходит неодинаково: либо через исчезновение одной из семядолей (гетерокотилия), либо через слияние двух семядолей в одну (синкотилия), либо предполагается, что одновременно имеют место оба процесса [5]. Однодольные растения «стабильно» развивают единственную семядолю. Каким образом они эту семядолю заполучили – до сих пор предмет научных споров [2, 13, 3, 1, 9]. Для того чтобы в этом разобраться, необходимо изучить строение зародыша или проростка у ближайших родственников однодольных растений.

### **Гидателловые – необычные и неожиданные родственники Кувшинковых**

До появления молекулярно-генетических методов установления родства в родственники к однодольным, по мнению разных авторов, попадали самые разные двудольные, так или иначе проявляющие «однодольные» признаки в строении цветка или вегетативных органов. Такой группой долгое время считались представители семейств Кувшинковые (*Nymphaeaceae*) и Кабомбовые (*Cabombaceae*) [4, 10], которые согласно современным представлениям вместе с семейством Гидателловые (*Hydatellaceae*) образуют порядок Кувшинкоцветные (*Nymphaeales*) (APG III, 2009). К Кувшинковым из известных всем растений относятся Кувшинка (Водяная лилия) и Кубышка, а Кабомбовые знакомы держателям аквариумов. Родство этих растений с однодольными молекулярные данные не подтвердили, однако очень интересен набор семейств, которые объединились в один порядок. Насчет родства Кувшинковых и Кабомбовых никто и ранее не сомневался. Гидателловые попали в родичи к Кувшинковым очень неожиданно [21].

Гидателловые – небольшие и в основном однолетние растения, распространенные в Австралии, Новой Зеландии и Индии [22]. Они представля-

ют собой розетку линейных листьев длиной не более 5 см, из которой на длинной или короткой ножке торчат «цветки». В отличие от царственной кувшинки, «цветки» гидателловых не превышают длины 5 мм. (*рис.1 цветной вкладки*). У этих «цветков» есть еще одна особенность – тычинки расположены в центре цветка, там, где у «нормальных» цветков положено быть пестику [17, 19, 24]. Из-за этого «цветки» гидателловых большинство ученых не признают цветками и рассматривают их как своеобразные очень компактные соцветия. Весь внешний облик этих растений не позволяет предположить их «настоящее» положение в системе цветковых растений. Ранее их помещали в родственники к злакам, т.е. считали однодольными растениями! По совокупности внешних признаков Гидателловые действительно сильно похожи на однодольные. (*рис.2 цветной вкладки*).

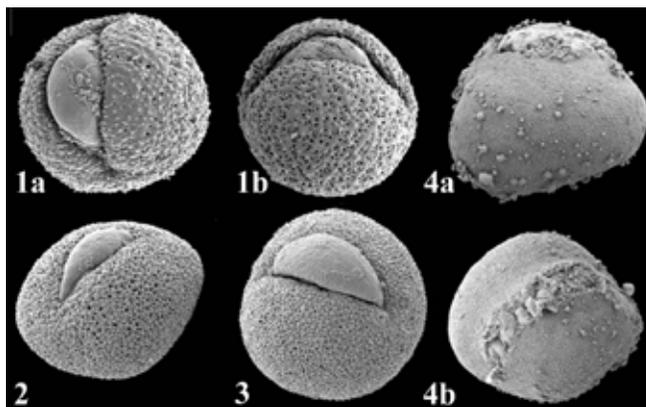
Как только стали известны данные анализа ДНК, немедленно нашлись и морфологические признаки, которые подтвердили родство Гидателловых с Кувшинковыми и Кабомбовыми. Это эмбриологические признаки, т.е. признаки строения семязачатка и самого семени [21, 11, 18]. Самое интересное, что эмбриология Гидателловых в общих чертах была изучена сравнительно давно [14]. Но эмбриологические данные по Кувшинковым и Кабомбовым до относительно недавнего времени [7] или отсутствовали, или были не верны в отношении самого важного признака – строения женского гаметофита (зародышевого мешка). Неудивительно, что «никто не догадался». Необходимо также отметить, что по некоторым признакам, например, по строению пыльцевых зерен, Гидателловые очень похожи на однодольные растения [16]. Однако, как и в случае пыльцевых зерен, это такие признаки, по которым большинство архаичных двудольных растений (в том числе, кувшинковые) похожи на однодольные растения. Сходство по таким признакам не противоречит исключению гидателловых из состава однодольных. Эти признаки, скорее всего, были присущи общим предкам цветковых растений.

### **Строение проростков Кувшинковых**

Строение проростков Кувшинок и Кубышек хорошо известно. Удивительно, что при простом и ясном устройстве проростка, к окончательному выводу о его строении пришли далеко не сразу. Вот что говорит современная наука о структуре проростка Кувшинки [28]. В семени находятся две супротивные семядоли, которые немного разные по размеру и совсем немного срастаются между собой в основании. При прорастании семени верхушки семядолей остаются в семени, но есть и небольшие свободные части, расположенные под уровнем субстрата. Прорастание, таким образом, подземное. Для того чтобы верхушка стебля могла расти вверх и не упереться в семя, основания семядолей искривляются, смещая семя вбок. Здесь необходимо сделать важное отступление. Всем растениям, имеющим семена, приходится решать вопрос о том, как дать верхушке проростка расти в нужном направлении и освободиться от оболочек семени при его прорастании [27]. Как эту проблему решает Кувшинка, изложено выше. Обычно верхушка будущего побега смотрит внутрь семени, а верхушка будущего корня наружу (именно поэтому при прорастании семени корень появляется первым). Некоторые

двудольные растения поворачивают сам зародыш, изгибая его ось. Другие запасают питательные вещества в семядолях, и при прорастании семени разбухающие семядоли сбрасывают ненужную семенную оболочку, освобождая пространство для роста. Однодольные пошли еще дальше. Многие из них имеют семядолю с гаусториальной верхушкой. При прорастании семени семядоля резко увеличивается в размерах и выносит семя на достаточное отдаление от растущей верхушки проростка.

### Число семядолей у Гидателловых и Кувшинковых: одинаковое или разное?



**Рис. 1.** Пыльцевые зерна Гидателловых – *Trithuria submersa* (1), *Trithuria konkanensis* (2), *Trithuria australis* (3) и Кабомбовых – *Brasenia schreberi* (4), по [16]

А сколько же у Гидателловых семядолей? До недавнего времени их не считали! Связано это не только с нежеланием изучить вопрос детально (всем же видно, что однодольное!), но и с недоступностью материала по проросткам. Найти Гидателловые в природе – очень сложная задача. (рис.1) Соответственно, добыть проростки еще труднее. Как только «прыжок» Гидателловых от злаков к кувшинкам стал достоянием научной общественности, сразу были организованы экспедиции, были собраны семена, которые научились проращивать в лабораторных условиях. Но Гидателловые так просто не сдавались. У большинства растений семядоли можно сосчитать еще в зародыше семени. Особенности жизненного цикла у Гидателловых таковы, что семена опадают с растений с несформированным зародышем. Зародыш формируется непосредственно перед прорастанием семени, очень зависящим от условий среды, к которым Гидателловые приспособлены в природе. Создать такие условия в лаборатории – очень сложная задача. Но и этот рубеж был пройден. Мельчайшие проростки были изучены вдоль и поперек – под сканирующим электронным микроскопом [29, 22], по сериям анатомических срезов, прошедших в разных плоскостях [20, 12, 27]. Выяснилось, что не у всех видов Гидателловых проростки одинаковые. В семействе всего 12 видов, принадлежащих к одному роду Тритурия, и такое разнообразие! Сначала показалось, что семядоля все-таки одна (размеры семени таковы, что двум вроде бы разместиться негде). Тут вспомнили про Кувшиноцветные и

происхождение от них двудольных. Если не всех однодольных, то хотя бы Гидателловых могли Кувшинкоцветные породить?

### Строение проростка гидателловых: разнообразие и гипотезы о морфологических преобразованиях

Что сразу стало очевидно, так это наличие у Гидателловых гаусторий. У некоторых видов гаустория отходит не от стебля проростка, а от двулопастной трубчатой структуры, которая, как воротничок, окружает стебель. Этот воротничок не до основания замкнут со стороны, противоположной месту прикрепления гаустории. Таким образом, даже при однодольной интерпретации проростков можно увидеть некую двулопастность. Свидетельство ли это двух сросшихся семядолей?

Сравнение с проростками Кувшинковых показывает, что верхушки лопастей на трубчатой структуре – не то же самое, что верхушки семядолей. Верхушка семядоли должна быть в семени. Все выдвинутые ранее теории о том, как «сделать» из двудольного проростка Кувшинки что-то однодольное, на Гидателловых «сломались».

Что не так? Надо выдвинуть новую теорию? Оказалось, что все проще. Точнее, сложнее. Проще в том, что семядолей у Гидателловых все-таки две. А сложность в том, что исследования должны быть более тонкими и

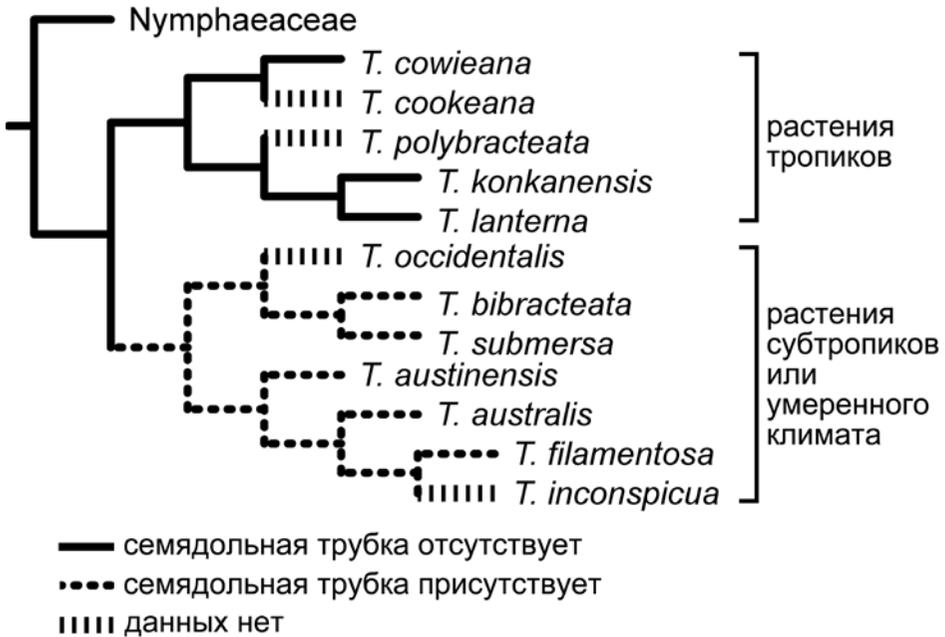


Рис.2. Молекулярно-филогенетическое древо Гидателловых с нанесенными на него данными по строению проростков (рис. из [27] на основе дерева из [15])

затрагивать все стадии прорастания семени. По строению проростков все Гидателловые можно разделить на три группы [27]. Вне зависимости от группы верхушки семядолей находятся в семени и передают из него питательные вещества в проросток. У растений первой группы основания семядолей прикрепляются к трубчатой структуре, верхняя часть которой возвышается над поверхностью земли. Во второй группе обе семядоли не фотосинтезируют и отходят от одной стороны стебля (у Кувшинковых с разных сторон), с другой стороны стебля отходит первый настоящий лист.

У растений третьей группы семядоли имеют вид обычных листьев (они супротивные), у каждого из которых от одной стороны при основании отходит гаусториальная часть. Часть семядоли находится под землей вместе с семенем, другая возвышается над субстратом и фотосинтезирует. Тип проростка видоспецифичен, т.е. часть видов стабильно развивают проростки только первой, только второй или только третьей группы. Как объяснить наблюдаемое разнообразие в строении проростков и соединить два противоположных полюса: односторонние нефотосинтезирующие семядоли и супротивные фотосинтезирующие? (рис. 2)

Рассуждения можно выстраивать в двух взаимно противоположных направлениях. Растения первой группы – самые примитивные. Именно у них развитие зародыша семени и образование проростка изучено наиболее полно [12]. У зародыша, который сначала шарообразный, супротивно закладываются две семядоли (напомним, что у Кувшинковых семядоли тоже супротивные). Верхушка зародыша, как и у большинства растений, обращена внутрь семени. Чтобы вынести верхушку на поверхность, семядоли начинают расти асимметрично, «выворачивая» зародыш наружу. В результате такого неравномерного роста ось зародыша поворачивается на 90 градусов относительно исходного положения, а сами семядоли становятся резко ассиметричными, у них образуется гаусториальная часть и часть, образующая трубку-воротничок. Очевидно, что трубка не так уж и нужна. Фотосинтез она в силу размеров осуществляет плохо, но клеточный материал на нее затрачивается. Процесс образования семядолей можно оптимизировать, «удалив» из процесса развития «лишнюю» стадию образования трубки. Но тогда с самого начала необходимо развивать несимметрично расположенные семядоли. В результате преобразований получим растения второй группы. С другой стороны, можно усилить фотосинтезирующую функцию «воротничка», сохранив при этом супротивное расположение самих семядолей. Воротничок разрастется в два крупных листа, таких же, как остальные листья растения. Для этого можно задействовать программу развития настоящих листьев, совместив ее с уже имеющейся программой развития гаусториальных семядолей. Назовем это теорией №1. По этой теории выходит, что «настоящие» верхушки семядолей в любом случае находятся в семени, как у Кувшинки. Верхушки лопастей трубчатой структуры у растений первой группы и верхушки листовидных образований у растений третьей группы являются результатом асимметричного роста, представляя собой «вторичные» верхушки [27]. (рис.3 цветной вкладки).

Есть и вторая теория. Начало ее такое же, как и в первом варианте. Далее надо рассуждать от растений второй группы, где семядоли по своему строе-

нию наиболее приближены к семядолям Кувшинковых и отличаются от них лишь односторонним положением на стебле. Эту однобокость можно объяснить необходимостью выдвинуть верхушку зародыша за пределы семени. Эту задачу растения, как мы помним, решают по-разному. Гидателловые пошли своим особым путем. Ось зародыша они не изгибают, но поворачивают весь зародыш целиком благодаря асимметричному росту семядолей. Между заложением семядолей и настоящих листьев должно пройти достаточно времени, так как первый лист должен появиться на уже развернутом в нужной плоскости зародыше. У некоторых видов, если семя начинает прорастать глубоко под землей, чтобы вынести верхушку проростка на поверхность, семядольный узел растягивается, и вслед за ним растягиваются основания семядолей. Образуется так называемый мезокотиль. Удлинения стебля между местом прикрепления семядолей и первым листом при этом не происходит. Первый лист сидит супротивно семядолям, охватывая стебель со всех сторон. В процессе образования мезокотили ростовые процессы могут пройти таким образом, что верхние края растянувшихся семядольных оснований могут прирасти основанию листа. Если первый лист расположен строго напротив, то с большей вероятностью обе семядоли соединятся с левым и правым краями листа. (*рис.4 цветной вкладки*). Если же первый лист расположен несколько косо, то только одна из семядолей «получит возможность» прирасти к листу. Чтобы получить проростки третьего типа, представим, что первый лист повернулся на 90 градусов относительно исходной позиции. Такое возможно, поскольку в силу мелких семядолей и позднего заложения первого листа его положение не закреплено строго. У всех проростков второй настоящий лист расположен напротив первого. Развернув первый лист на 90 градусов, также развернется и второй. Оба листа одним из своих краев будут повернуты в сторону семядолей. При образовании мезокотили каждый лист «получит» по семядоле. Согласно этой теории, то, что мы воспринимаем у проростков третьего типа как семядоли, на самом деле представляет собой сочетание двух структур: собственно семядолей и двух настоящих листьев. (*рис.5 цветной вкладки*).

## Вопросы на будущее

Какой теории отдать предпочтение – вопрос дальнейших исследований. Для этого необходимо во всех мельчайших подробностях изучить формирование зародыша и прорастание семени у всех видов гидателловых. Интересно, что выявленное нами впервые у Гидателловых образование мезокотилиа [27] – то есть, похожего на междоузлие продольного разрастания семядольного узла – хорошо известно у злаков и осоковых [30]. У злаков при образовании мезокотилиа он разделяет гаусториальную часть единственной семядоли (щиток) и ее верхнюю часть (так называемое колеоптиле). Это очень похоже на то, как, по одной из рассмотренных нами теорий, гаусториальная и фотосинтезирующая части семядолей некоторых Гидателловых «раздвигаются» мезокотилем. Но ведь злаки – это как раз те растения, с которыми – ошибочно! – гидателловые ранее сближали систематики. Дальнейшие исследования должны ответить на вопрос, с чем связано такое сходство между

двумя, теперь уже не родственными группами. Вероятно, это сходство необходимо теперь объяснять сходными способами решения одних и тех же проблем (запретов) в морфолого-функциональной организации проростков и особенностях их развития. (рис.6 цветной вкладки).

## Литература

1. Батыгина Т.Б., Красников Л.Г. Новая концепция происхождения зародыша однодольных // Эмбриология цветковых растений. Терминологии и концепции. – Т. 2. Семя / под ред. Т.Б. Батыгиной. СПб.: Мир и семья – 95, 1997. – С. 470–492.
2. Кудряшов Л.И. Происхождение односемядольности (на примере Helobiae) // Ботанический журнал. – 1964. – Т. 49, № 4. – С. 473–486.
3. Лодкина М.М. Эволюционные отношения однодольных и двудольных по данным изучения зародышей и проростков // Ботанический журнал. – 1988. – Т. 73, № 5. – С. 617–629.
4. Тахтаджян А.Л. Система магнолиофитов. – Л.: Наука, 1987. – 438 с.
5. Титова Г.Е. О природе псевдомонокотилии у цветковых растений // Ботанический журнал. – 2000. – Т. 85, № 7. – С. 76–91.
6. Титова Г.Е. Биология прорастания *Pinguicula vulgaris* (Lentibulariaceae) // Ботанический журнал. – 2012. – Т. 97, № 9. – С. 1137–1162.
7. Шамров И.И., Винтер А.Н. Развитие семяпочки у представителей родов *Nymphaea* и *Victoria* (Nymphaeaceae) // Ботанический журнал. – 1991. – Т. 76, № 8. – С. 1072–1083.
8. APG (Angiosperm Phylogeny Group) III. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG III. Botanical Journal of the Linnean Society. – 2009. – Vol. 161. – P. 105–121.
9. Burger W.C. The question of cotyledon homology in angiosperms // Botanical Review. – 1998. – Vol. 64. – P. 356–371.
10. Cronquist A. The evolution and classification of flowering plants. Bronx: The New York Botanic Garden, 1988. – 555 p.
11. Friedman W.E. Hydatellaceae are water lilies with gymnospermous tendencies // Nature. – 2008. – Vol. 453. – P. 94–97.
12. Friedman W.E., Bachelier J.B., Hormaza J.I. Embryology in *Trithuria submersa* (Hydatellaceae) and relationships between embryo, endosperm, and perisperm in early-diverging flowering plants // American Journal of Botany. – 2012. – Vol. 99. – P. 1083–1095.
13. Haines R.W., Lye K.A. Monocotylar seedlings : a review of evidence supporting an origin by fusion // Botanical Journal of the Linnean Society. – 1979. – Vol. 78. – P. 123–140.
14. Hamann U. Neue Untersuchungen zur Embryologie und Systematik der Centrolepidaceae // Botanische Jahrbücher 1975. Bd. 96. S. 154–191.
15. Iles W., Rudall P.J., Sokoloff D.D., Remizowa M.V., Macfarlane T.D., Logacheva M.D., Graham S.W. Molecular phylogenetics of Hydatellaceae (Nymphaeales): sexual-system homoplasy and a new sectional classification // American Journal of Botany. – 2012. – Vol. 99, N 4. – P. 663–676.
16. Remizowa M.V., Sokoloff D.D., Macfarlane T.D., Yadav S.R., Prychid C.J., Rudall P.J. Comparative pollen morphology in the early-divergent angiosperm

family Hydatellaceae reveals variation at the infraspecific level // *Grana*. – 2008. – Vol. 47, N 2. – P. 81–100.

17. Rudall P.J., Sokoloff D.D., Remizowa M.V., Conran J.G., Davis J.I., Macfarlane T.D., Stevenson D.W. Morphology of Hydatellaceae, an anomalous aquatic family recently recognized as an early-divergent angiosperm lineage // *American Journal of Botany*. – 2007. – Vol. 94, N 7. – P. 1073–1092.

18. Rudall P.J., Remizowa M.V., Beer A.S., Bradshaw E., Stevenson D.W., Macfarlane T.D., Tuckett R.E., Yadav S.R., Sokoloff D.D. Comparative ovule and megagametophyte development in Hydatellaceae and water lilies reveal a mosaic of features among the earliest angiosperms // *Annals of Botany*. – 2008. – Vol. 101. – P. 941–956.

19. Rudall P.J., Remizowa M.V., Prenner G., Prychid C.J., Tuckett R.E., Sokoloff D.D. Nonflowers near the base of extant angiosperms? Spatiotemporal arrangement of organs in reproductive units of Hydatellaceae and its bearing on the origin of the flower // *American Journal of Botany*. – 2009a. – Vol. 96, N 1. – P. 67–82.

20. Rudall P.J., Eldridge T., Tratt J., Ramsay M.M., Tuckett R.E., Smith S.Y., Collinson M.E., Remizowa M.V., Sokoloff D.D. Seed fertilization, development, and germination in Hydatellaceae (Nymphaeales): Implications for endosperm evolution in early angiosperms // *American Journal of Botany*. – 2009b. – Vol. 96, N 9. – P. 1581–1593.

21. Saarela J.M., Rai H.S., Doyle J.A., Endress P.K., Mathews S., Marchant A.D., Briggs B.G., Graham S.W. Hydatellaceae identified as a new branch near the base of the angiosperm phylogenetic tree // *Nature*. – 2007. – Vol. 446. – P. 312–315.

22. Sokoloff D.D., Remizowa M.V., Macfarlane T.D., Tuckett R.E., Ramsay M.M., Beer A.S., Yadav S.R., Rudall P.J. Seedling diversity in Hydatellaceae: implications for the evolution of angiosperm cotyledons // *Annals of Botany*. – 2008a. – Vol. 101. – P. 153–164.

23. Sokoloff D.D., Remizowa M.V., Macfarlane T.D., Rudall P.J. Classification of the early-divergent angiosperm family Hydatellaceae: one genus instead of two, four new species and sexual dimorphism in dioecious taxa // *Taxon*. – 2008b. – Vol. 57, N 1. – P. 179–200.

24. Sokoloff D.D., Remizowa M.V., Yadav S.R., Rudall P.J. Development of reproductive structures in the sole Indian species of Hydatellaceae, *Trithuria konkanensis*, and its morphological differences from Australian taxa // *Australian Systematic Botany*. – 2010. – Vol. 23. – P. 217–228.

25. Sokoloff D.D., Remizowa M.V., Macfarlane T.D., Yadav S.R., Rudall P.J. Hydatellaceae: a historical review of systematics and ecology // *Rheede*. – 2011. – Vol. 21, N 2. – P. 115–138.

26. Soltis D.E., Smith S.A., Cellinese N., Wurdack K.J., Tank D.C., Brockington S.F., Refulio-Rodriguez N.F., Walker J.B., Moore M.J., Carlswald B.S., Bell C.D., Latvis M., Crawley S., Black C., Diouf D., Xi Z., Rushworth C.A., Gitzendanner M.A., Sytsma K.J., Qiu Y.-L., Hilu K.W., Davis C.C., Sanderson M.J., Beaman R.S., Olmstead R.G., Judd W.S., Donoghue M.J., Soltis P.S. Angiosperm Phylogeny: 17 genes, 640 taxa // *American Journal of Botany*. – 2011. – Vol. 98. – P. 704–730.

27. Sokoloff D.D., Remizowa M.V., Beer A.S., Yadav S.R., Macfarlane T.D., Ramsay M.M., Rudall P.J. Impact of spatial constraints during seed germination on the

evolution of angiosperm cotyledons: a case study from tropical Hydatellaceae (Nymphaeales) // *American Journal of Botany*. – 2013. – Vol. 100, N 5. – P. 824-843.

28. *Tillich H.-J.* Die Keimpflanzen der Nymphaeaceae – monocotyl oder dicotyl? *Flora*. 1990. Bd. 184. S. 169–176.

29. *Tillich H.-J.* Seedling diversity and the homologies of seedling organs in the order Poales (Monocotyledons) // *Annals of Botany*. – 2007. – Vol. 100. – P. 1413–1429.

30. *Tillich H.-J., Tuckett R., Facher E.* 2007. Do Hydatellaceae belong to the monocotyledons or basal angiosperms? Evidence from seedling morphology // *Willdenowia*. – 2007. – Vol. 37. – P. 399–406.

# Как салициловая кислота помогает растениям создавать иммунитет против болезнетворных микроорганизмов

И.А. Тарчевский, В.Г. Яковлева, А.М. Егорова, Н.В. Петрова

**Тарчевский Игорь Анатольевич**, доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник, Казанского института биохимии и биофизики Казанского научного центра РАН.

**Яковлева Вера Гавриловна**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Казанского института биохимии и биофизики Казанского научного центра РАН.

**Егорова Алевтина Михайловна**, кандидат биологических наук, научный сотрудник Казанского института биохимии и биофизики Казанского научного центра РАН.

**Петрова Наталья Валентиновна**, кандидат биологических наук, научный сотрудник Казанского института биохимии и биофизики Казанского научного центра РАН.

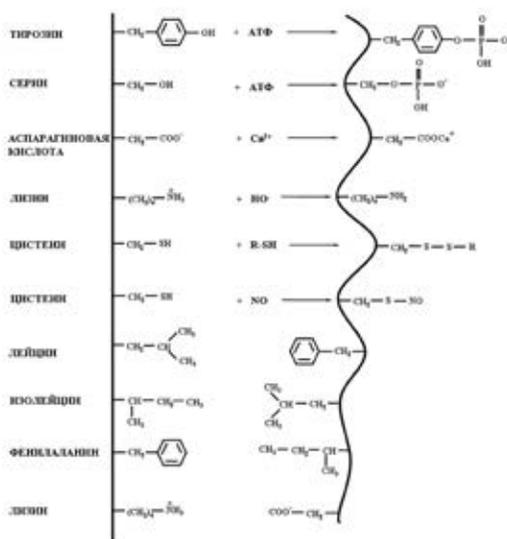
## Введение

Задачей наших исследований на протяжении многих лет была расшифровка молекулярных механизмов выработки иммунитета у растений. Для этого мы стали изучать, как патогенные микроорганизмы и ключевой фактор иммунитета – салициловая кислота, – действуют на набор и содержание белков (на протеом) у растений. Разделение белков производилось с помощью двумерного электрофореза, идентификация белков – с помощью масс-спектрометрического анализа. Протеомы оказались в центре нашего внимания потому, что белки принимают участие во всех без исключения жизненно важных процессах: в делении клеток, их росте, дифференциации, в ответе на изменения окружающей среды, в экспрессии генов, в синтезе, сохранении, функционировании и распаде нуклеиновых кислот и самих белков, в их перемещении внутри клетки и транспорте за ее пределы, а также в защите от болезнетворных (патогенных) микроорганизмов.

## Особенности структуры белков

Причина такой полифункциональности белков кроется в особенностях их строения. Как известно,

они состоят более чем из 20 аминокислот, причем для каждого белка характерна «своя» последовательность расположения этих аминокислот (получившая название первичной структуры). Аминокислоты имеют в своем составе не менее чем по одной карбоксильной группе (-COOH) и аминогруппе (-NH<sub>2</sub>), реакция между ними приводит к образованию пептидной группы (-OC-NH-). Этот принцип лежит и в основе синтеза полипептидов – белков, у которых не входящие в состав пептидных групп радикалы выступают в роли свободных боковых групп. Если в составе аминокислоты имеются две аминогруппы, то одна из них остается свободной и может нести положительный заряд (R-NH<sub>3</sub><sup>+</sup>), в то время как в случае двух карбоксильных групп свободная может приобретать отрицательный заряд (R-COO<sup>-</sup>). У аминокислот лейцина, изолейцина, валина, фенилаланина имеются гидрофобные боковые группы (рис. 1), которые могут концентрироваться вместе в определенных участках белка, образуя гидрофобные домены, способные притягиваться к гидрофобным остаткам подобных аминокислот в других белках (гидрофобное взаимодействие), в результате чего образуются олигомерные белковые структуры. Некоторые аминокислоты имеют в боковых цепях гидроксильные группы, которые способны фосфорилироваться (рис. 1). За счет этого появляется отрицательно заряженный участок белка (R-ОРО<sub>3</sub><sup>2-</sup>), что сказывается на конформации белка. На рис. 1 исходная полипептидная цепь изображена в виде прямой линии, а конформационно преобразованная – в виде волнистой линии. Сульфгидрильная группа (R-SH) в остатке аминокислоты цистеина способна, окисляясь, образовывать ковалентную «сшивку» (R-S-S-R) с другой окисляющейся сульфгидрильной группой в том же самом или в соседнем белке, что не может не отразиться на конформации этих белков. Обратная реакция восстановления -S-S- приводит к возвращению исходной конформации. Сульфгидрильные группы остатков цистеина могут также нитрозилироваться, взаимодействуя с молекулами NO, что приводит к появлению радикалов -SNO и изменяет некоторые свойства белков. Белковые цепи в водной среде клетки могут иметь различную конформацию в зависимости от числа и последовательности чередования в них заряженных и гидрофобных аминокислот. Ее изменения могут быть вызваны, напри-



**Рис. 1.** Схема возможного участия белковых остатков аминокислот в изменении конформации белков.

мер, подкислением цитоплазмы, повышением в ней содержания активных форм кислорода, ионов кальция, ферментов протеинкиназ (катализирующих фосфорилирование белков), что наблюдается при действии на клетки патогенных микроорганизмов. Изменение конформации может открыть прежде замаскированные боковые цепи белков (например, с радикалами -SH, -OH, -COO-, -NH<sub>3</sub><sup>+</sup> и т.д.) и разрешить те реакции белка, на которые исходная форма была неспособна.

Мы специально рассмотрели некоторые довольно простые примеры возможных причин изменения конформации белков, а значит, и особенностей их функционирования. Дело в том, что в передаче в генетический аппарат (геном) клеток информации о начинающемся инфицировании растений решающую роль играют изменения конформации различных по структуре белковых посредников, обслуживающих сигнальные цепи.

В состав сигнальных цепей входят следующие звенья (*рис.1 цветной вкладки*): сигналы от патогенов → рецепторы этих сигналов → преобразование одних сигналов в другие в цитоплазме → передача преобразованных сигналов в ядро → их взаимодействие с геномом → репрограммирование экспрессии генов и синтез измененного набора матричных РНК → выведение мРНК за пределы ядра и их использование рибосомами для синтеза белков. Адаптивное репрограммирование экспрессии генов приводит и к изменениям в наборе и содержании белков. В результате повышается сопротивляемость клеток инфекции, усиливается их иммунитет против различных патогенов.

### **Как растения узнают сигналы, идущие от патогенных микроорганизмов**

При контакте с растениями клетки патогенных микроорганизмов выделяют набор соединений, обеспечивающих их внедрение в ткани «хозяина», питание и ослабление защитных свойств растений [1]. В ходе эволюции растения «научились» распознавать эти «сигналы опасности» и в ответ на них включать сложную систему защитных реакций, обеспечивающих им иммунитет против патогенов. Первая линия этой оборонительной системы – это узнавание сигналов, идущих от патогенов. Это происходит главным образом с помощью сложно устроенных рецепторных белков, расположенных «на границе» клетки – в плазмалемме. У этих белков над плазмалеммой располагаются своеобразные антенны, отличающиеся довольно большим разнообразием, что позволяет «захватывать» (присоединять) различные «сигналы опасности». В результате такого контакта конформация антенны изменяется и сигнал об этом изменении передается внутрь клетки с помощью закрепленного в плазмалемме участка рецепторного белка. Этот участок отличается преобладанием гидрофобных белков, взаимодействующих с гидрофобными липидами плазмалеммы. Когда конформационный импульс достигает внутриклеточной части рецепторного белка, он изменяет ее конформацию таким образом, что существенно повышает способность связываться с цепью белковых посредников, передающих информацию об опасности в ядро, в находящийся там генетический аппарат клетки (*рис.2 цветной вкладки*).

Это приводит к тому, что постоянно функционирующая совокупность ядерных генов изменяет программу синтеза матричных РНК и начинает синтез таких их форм, которые кодируют PR- белки (pathogenesis- related), т.е. белки связанные с патогенезом. К ним относятся, например, ферменты хитиназы, которые могут разрушать клеточные стенки многих патогенов, что нарушает их жизнедеятельность. Следует отметить, что многие патогены пытаются преодолеть эту «линию обороны», начиная в ответ вырабатывать такие соединения (так называемые эффекторы), которые могут проходить в растительные клетки «незамеченными» мембранными рецепторами и начинают подавлять выработку PR-белков. В ходе эволюции растения создали линию обороны и против эффекторов. Не в плазмалемме, а в цитоплазме растительных клеток существуют белковые рецепторы эффекторов, похожие на мембранные, но не имеющие трансмембранного гидрофобного домена. Своей «антенной» частью они узнают и связывают молекулы эффекторов. Это приводит к тому, что снижается их концентрация, но главное, связывание эффекторов приводит к изменению конформации антенной части цитоплазматических рецепторов и этот конформационный импульс передается в другую часть рецептора, которая активируется и через цепь посредников передает в ядерный геном информацию о второй волне атаки патогенов. Это приводит к синтезу новых матричных РНК и, как следствие, тех белков, которые выстраивают вторую линию обороны от патогенов.

### **Что собой представляют посредники, обеспечивающие связь между рецепторами и ядерными генами**

Было обнаружено, что после контакта с патогенами в растительных клетках многократно (иногда в десятки раз) повышается содержание ключевого фактора фитоиммунитета – салициловой кислоты [2]. Это вызвано тем, что мембранные рецепторы в ответ на атаку патогенов «включают» механизм сначала активации, а затем повышения содержания ферментов, катализирующих образование салициловой кислоты – фенилаланинамиак-лиазы и изохоризмат-синтазы (*рис.2 цветной вкладки*). Образовавшаяся салициловая кислота способна взаимодействовать с имеющимся в цитоплазме транскрипционно неактивным олигомерным специфическим белком – коактиватором транскрипции NPR1 (non-expressor of pathogenesis-related genes1), что подчеркивает его неспособность к самостоятельной активации экспрессии гена, отвечающего за синтез маркерного защитного белка PR1). В результате олигомерная форма NPR1 преобразуется в мономерную за счет восстановления ее дисульфидных связей (–S–S–). Мономерные молекулы NPR1, в отличие от олигомерной формы, способны транспортироваться в ядро (*рис.3 цветной вкладки*), и активировать там важнейшие белки – факторы регуляции транскрипции (ФРТ) двух типов: TGA и WRKY. Первые обладают способностью взаимодействовать с TGAA последовательностью нуклеотидов, а вторые – с последовательностью W-боксов (TTGACC/T) промоторных участков генов, что приводит к активации одних генов, кодирующих защитные белки, и инактивации других (кодирующих белки, не являющиеся необходимыми в условиях крайней опасности, вызванной инфицированием патогенами).

В процессах, связанных с преобразованиями олигомерных форм NPR1 в мономерные и активацией ФРТ, принимают участие реакции восстановления их дисульфидных групп, а также присоединения к ним фосфорной кислоты и монооксида азота NO. Очень важно, что в случае обработки растений раствором салициловой кислоты она также вызывает активацию аналогичных реакций. Это позволило использовать для защиты растений от патогенов препараты, содержащие салициловую кислоту или ее производные.

### **Характеристика белков, синтез и содержание которых в растениях повышается при их инфицировании патогенами**

Необходимо отметить, что в клетках растений (так же, как у животных и микробных клеток) постоянно происходят процессы синтеза новых и распада старых (отслуживших) молекул белков. При действии патогенов или внешней салициловой кислоты на растения в них изменяется (усиливается или затормаживается) синтез нескольких процентов белков, содержание остальных сохраняется на прежнем уровне.

Белки, синтез которых усиливается при действии салициловой кислоты, относятся к различным функциональным категориям (*рис. 3 цветной вкладки*).

1. Патогениндуцированные белки – хитиназы, глюканазы, протеазы и ингибиторы протеаз [3, 4]. Первые два фермента разрушают клеточные стенки, а третий – белки патогенов. Ингибиторы протеаз снижают активность выделяемых патогенами протеаз и, вследствие этого, разрушение белков клеток инфицируемых растений, что затрудняет аминокислотное питание и размножение патогенных микроорганизмов.

2. Ферменты синтеза небелковых защитных веществ – фитоалексинов (phyton – растение, alexo – защита). Вызываемое салициловой кислотой усиление синтеза этих ферментов приводит к повышению содержания фитоалексинов, представляющих собой токсические для патогенов достаточно сложные органические соединения, состоящие, например, из нескольких шести- и пятичленных колец.

3. Мембранные и цитоплазматические рецепторы, соответственно, первичных сигналов от патогенов и эффекторов [5]. Повышение их содержания приводит к усилению вероятности рецепции молекулярных сигналов, продуцируемых патогенами, и «включения» сигнальных цепей, завершающихся репрограммированием экспрессии генов и синтезом защитных белков.

4. Ферменты фенилаланинаммиак-лиаза и изохоризмат-синтаза. Повышение их содержания приводит к усилению образования салициловой кислоты (*рис. 3*), что, в свою очередь, вызывает еще большую активацию синтеза этих ферментов (явление автокатализа).

5. Коактиваторы транскрипции NPR1 и факторы регуляции транскрипции TGA и WRKY. Усиление их синтеза также приводит к автокатализу защитного ответа против патогенов.

6. Белки, участвующие в переносе NPR1 в ядро и образовавшихся при транскрипции молекул РНК из ядра в цитоплазму. Эти белки входят в состав сложных белковых комплексов, обеспечивающих функционирование

пор ядерной мембраны и повышают эффективность трансмембранных переносов NPR1 и РНК.

7. РНК-связывающие белки. Обеспечивают стабилизацию и сохранность «новорожденных» РНК, участвуют в процессинге (преобразовании в зрелые формы) матричных РНК.

8. Факторы элонгации трансляции, принимающие участие в синтезе белка рибосомами. Повышение их содержания вызвано потребностью растений в усилении синтеза белков, от которых зависит формирование иммунитета.

9. Белок – ядерный антиген пролиферирующих клеток. Обеспечивает репликацию ДНК и восстановление ее структуры, нарушенной в результате неблагоприятных воздействий. Этим объясняется факт особенно сильного повышения его содержания при высоких концентрациях салициловой кислоты, вызывающих начинающееся отмирание растительных клеток [6]. Этот белок представляет собой кольцевой структуры платформу, от взаимодействия с которой зависит построение одного из самых сложных комплексов, состоящих из ДНК и свыше 20 белков (т.н. реплисома).

10. Белки шапероны, при взаимодействии с «новорожденными» белками сохраняющие их нативную структуру, а также возвращающие к норме структуру белков с нарушенной конформацией [7]. Относятся к типичным комплексообразующим белкам, причем в образовании комплекса с белком «мишенью» могут принимать участие более чем один тип шаперонов.

11. Белки-субъединицы протеасом – сложных цитоплазматических и ядерных комплексов, участвующих в разрушении белков с нарушенной структурой (*рис.3 цветной вкладки*). Этот достаточно сложный и тонко регулируемый процесс протеолиза позволяет не только избавляться от ненужных белков, но и использовать образующиеся при этом свободные аминокислоты для синтеза защитных белков.

12. Белки автофагосом, от которых зависит еще один механизм разрушения белков с нарушенной структурой и, в связи с этим, не способных к нормальному функционированию. Было обнаружено, что цитоплазматические и мембранные белки с деформированной структурой могут включаться в образующиеся микропузырьки (автофагосомы), которые затем транспортируются к вакуолям и сливаются с ними. Деформированные белки при этом попадают внутрь вакуолей и там происходит их разрушение до аминокислот с помощью вакуолярных протеаз.

13. Белки сигнал-узнающих частиц (СУЧ), участвующие в выведении за пределы клетки антипатогенных белков (навстречу неприятелю-патогену) и белков, участвующих в укреплении клеточных стенок как механических барьеров, препятствующих проникновению патогенов в клетки (*рис.3 цветной вкладки*). СУЧ состоят из РНК и нескольких связанных с ней белков, в том числе образующихся под влиянием салициловой кислоты. Еще не полностью рожденные рибосомами белки, предназначенные для выведения за пределы клеток, имеют состоящий из нескольких аминокислот сигнальный участок, с которым и связывается СУЧ. При этом дальнейшее образование белка затормаживается, и комплекс, состоящий из рибосомы и СУЧ, транспортируется к поверхности мембраны эндоплазматической сети и связыва-

ется с находящимся там специальным рецептором. Это приводит к отделению СУЧ от комплекса и к «разрешению» завершения трансляции, причем формирующаяся цепь белка освобождается в просвет эндоплазматической сети. Далее с помощью пузырьков аппарата Гольджи этот белок доставляется к плазмалемме, после слияния с которой выводится в окружающее пространство (*рис.3 цветной вкладки*).

14. Вспомогательные белки, принимающие участие в построении олигомерных белковых комплексов. Они сами не принимают непосредственного участия в реакциях, но с их помощью начинают взаимодействовать белки, обычно «не замечающие» друг друга. Все вспомогательные белки можно подразделить на две категории. Адапторные белки (от латинского *adapto* – приспособлять), помогают объединяться и взаимодействовать двум ранее чужеродным белкам (*рис.4 цветной вкладки*). Платформенные белки за счет межбелкового взаимодействия позволяют закрепляться на себе и реагировать друг с другом более чем двум белкам. К платформенным белкам относятся, например, упоминавшийся выше ядерный антиген пролиферирующих клеток.

Необходимо отметить, что практически все этапы «узнавания» растениями патогенов, преобразования полученных сигналов мембранными и цитоплазматическими рецепторами, а также передачи сигналов в генетический аппарат с помощью посредников, осуществляются олигомерными белковыми комплексами [5]. Процессы транскрипции и трансляции осуществляются с помощью белковых комплексов, также как процессы, определяющие «судьбу» новорожденных белков (их стабилизацию, исправление нарушенной структуры, транспорт от рибосом в ядро, вакуоли и за пределы клетки, распад до аминокислот и т.д.).

15. Ферменты, принимающие участие в образовании активных форм кислорода, NO и ферменты-протеинкиназы, обеспечивающие перенос остатков фосфорной кислоты от АТФ на активируемые белки, в том числе на упоминаемые здесь ферменты.

16. Фермент салицилатметилтрансфераза, принимающий участие в синтезе из салициловой кислоты ее летучего метилового эфира. Это вещество способно по проводящим пучкам (вероятнее всего, по флоэме) транспортироваться из инфицированных участков, достигать неинфицированных органов растений, там опять превращаться в салициловую кислоту и вызывать появление иммунитета к патогенным микроорганизмам (*рис.5 цветной вкладки*). Этот долго сохраняющийся «наведенный» иммунитет называют системным в связи с тем, что он защищает неинфицированную часть растения против широкого круга патогенов. Так как метилсалицилат обладает свойством летучести, то он может достигать и соседних растений, «предупреждая» их об опасности и вызывая у них появление иммунных реакций.

Вызываемый салициловой кислотой усиленный синтез всех перечисленных выше белков представляет собой созданный и отлаженный в ходе эволюции механизм не только подавления развития патогенных микроорганизмов, но и оптимальной перестройки обмена веществ в новых условиях, что позволяет быстро сформировать иммунитет к широкому кругу патогенов.

## Саморегуляция салицилатной сигнализации

Продолжает привлекать большое внимание исследователей еще далеко не изученное свойство клеток растений регулировать содержание салициловой кислоты, а значит, и вызванных ею изменений в протеомах. Повышение содержания салициловой кислоты, вызванное атакой патогенов, «включает» сигнальные цепи, приводящие к усилению экспрессии генов, кодирующих синтез практически всех белковых участников сигнализации. Эти автокаталитические способности обеспечивают многократное повышение содержания салициловой кислоты в инфицируемых клетках («салицилатный взрыв») и подавление развития фитопатогенных микроорганизмов еще до того, как они начали интенсивно размножаться. Очевидно, что после выполнения этой задачи необходимо снизить интенсивность салицилатной сигнализации, чтобы не произошло ресурсное истощение клеток (в связи с тем, что вызванный патогенами и салициловой кислотой усиленный синтез защитных матричных РНК и белков обеспечивается тратой значительных запасов нуклеотидов, аминокислот, а также энергии). Действительно, было обнаружено, что после достижения максимальных значений содержание салициловой кислоты в инфицированных тканях растений начинает стремиться к исходному уровню. Молекулярные механизмы этого явления еще только начали изучаться и в основном остаются невыясненными. В основе салицилатного автоингибирования находится вызванное повышением содержания салициловой кислоты образование ингибиторов, способных подавляюще действовать на факторы транскрипции, от которых зависит экспрессия генов, кодирующих ферменты синтеза салициловой кислоты и многих белковых участников процесса репрограммирования экспрессии генов и синтеза белков (в том числе, синтеза самих этих факторов транскрипции).

## Заключение

Наши исследования, работы отечественных и зарубежных авторов показали, что салициловая кислота, как образующаяся в клетках растений при заражении патогенами, так и внешняя, используемая для обработки растений, вызывает образование не только защитных антипатогенных соединений, как это считалось раньше. При ее участии происходит доставка новообразованных белков в ядро, хлоропласты, митохондрии и вакуоли, за пределы плазмалеммы (в клеточную стенку и межклеточную среду). Салициловая кислота, с одной стороны, усиливает синтез, предохранение и «исправление» структуры важных для существования растений нуклеиновых кислот и белков (что имеет место при изменении внутриклеточной среды патогенами), а с другой – активирует механизмы торможения синтеза и усиления деградации ранее синтезированных белков, не столь необходимых для выживания растений при их инфицировании патогенами. Многие тонкие молекулярные механизмы регуляции с помощью салициловой кислоты процессов формирования иммунитета у растений остаются невыясненными и на их расшифровку направлены усилия ученых многих стран. Важность активизации работ в этом направлении определяется и тем, что достижения в этой области

позволят создавать эффективные препараты нового поколения для защиты растений от болезней, вызванных патогенными микроорганизмами.

### Литература

1. Тарчевский, И.А. Сигнальные системы клеток растений. (2002) – Наука. – Москва. – 294 с.
2. Васюкова Н.И., Озерецковская О.Л. (2007) Прикл. биохимия и микробиология, 43, 405–411.
3. Яковлева В.Г., Тарчевский И.А., Егорова А.М. (2007) ДАН, 415, 832–836.
4. Тарчевский И.А., Яковлева В.Г., Егорова А.М. (2010) Биохимия, 75, 689–697.
5. Тарчевский И.А., Яковлева В.Г., Егорова А.М. (2012) Физиология растений, 59, 532–542.
6. Тарчевский И.А., Яковлева В.Г., Егорова А.М. (2008) ДАН, 422, 410–414.
7. Тарчевский И.А., Яковлева В.Г., Егорова А.М. (2010) Прикл. биохимия и микробиология, 46, 263–275.

# Европейская жемчужница - вид, которому трудно приспособляться

А.А. Махров, И.Н. Болотов, В.С. Артамонова

**Махров Александр Анатольевич**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН;  
**Болотов Иван Николаевич**, доктор биологических наук, заместитель директора Института экологических проблем Севера Уральского отделения РАН;  
**Артамонова Валентина Сергеевна**, кандидат биологических наук, научный сотрудник Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН

## Хранители богатств северной реки

Один из парадоксов современной биологии состоит в том, что многие экзотические животные и растения, обитающие в непроходимых джунглях, на заснеженных вершинах или в океанских глубинах, изучены лучше, чем существа, известные людям тысячи лет и до сей поры живущие чуть ли не по соседству с первоклассными научными лабораториями.

Таков крупный двустворчатый моллюск, который до недавних пор был широко распространен в реках и ручьях как зарубежной Европы, так и северо-запада России – европейская жемчужница. Хотя ареал вида сократился, ее до сих пор можно встретить даже в водоемах на территории Санкт-Петербурга [13], а в некоторых реках, впадающих в Белое море, популяции сохранились почти в первозданном состоянии. (*рис.1 цветной вкладки*).

Этот моллюск, в котором изредка находят жемчуг, известен людям с древнейших времен. Внешне он ничем не примечателен: темно-коричневая раковина с трудом различима среди камней. Однако он занят важным делом – каждодневно колонии жемчужниц пропускают через себя огромную массу воды.

Часто говорят, что вода благодаря жемчужницам очищается, но ведь северные реки до недавних пор и без того были чисты! Более того, почти дистиллированная, бедная биогенами вода для многих обитателей рек – серьезная проблема: холодные чистые водоемы с проточной водой могут прокормить очень немного живых существ. И, как выяснилось совсем недавно [11], их число было бы еще меньше, если бы не жемчужницы. Ведь моллюски перехватывают мелкие частицы (органические и неорганические), которые течение норовит унести в океан, и откладывают их в грунт, тем самым обогащая его. В результате ценные биогены, сохраненные колонией жемчужниц, становятся источником пищи для других обитателей речного дна, а ими, в свою очередь, кормятся прочие жители реки, включая рыб. Вот так моллюск бережет тысячелетиями скудные ресурсы северных рек. (*рис.2 цветной вкладки*).

Человек ценил жемчужницу в основном за сокрытые в ней перлы, и она круто меняла порой не только судьбы отдельных людей, но и мировую историю. Так, в книге знатока жемчуга, А. Фарна [7], приводятся сведения о том, что Юлий Цезарь принял решение захватить Британию из-за богатства тамошних рек жемчугом.

Очень любили жемчуг и на Руси. Вышитые жемчугом одежды и оклады икон с крупными жемчужинами по сей день украшают экспозиции самых знаменитых музеев нашей страны. (*рис.3 цветной вкладки*).

Сегодня жемчужниц стало гораздо меньше, чем 100-200 лет назад, но и сейчас жемчужница занимает думы множества людей! Одни по-прежнему ждут от нее богатства, другие – вечной молодости, третьи – открытия тайн эволюции...

## Жемчужные пастухи

Одна из причин упадка жемчужного промысла – вылов жемчужницы в большинстве хорошо доступных рек. Дореволюционные издания полны сетованиями на хищнический лов – жемчужниц вылавливали, вскрывали, а потом выкидывали. Бывало, продавали скупщикам целыми корзинами. А ведь жемчуг встречается в одной из нескольких сот раковин, и далеко не всякий жемчуг подходит для украшений!

Но были в северных деревнях и настоящие знатоки жемчужницы и жемчуга. Они умели по внешнему виду раковин определять жемчугоносные. Но как им было конкурировать с массой односельчан, опустошающих реку? Семейство Келеваевых нашло выход: они стали «жемчужными пастухами»: маленьких жемчужниц переселяли с порогов Керети в глубокие плесы и в ручьи, где никто не догадывался их искать. А через десятилетия сын возвращался в указанное отцом место и осматривал огромные раковины.

К сожалению, династия прервалась – два брата Келеваевых не вернулись с Великой Отечественной войны. Их отец до конца жизни пользовался огромным уважением односельчан, консультировал столичных специалистов, но возродить жемчужный промысел после войны не удалось – советские юноши увлекались не старинными промыслами, а современной техникой, да и жемчужные украшения вышли из моды. За рубежом спрос на жемчуг был, но он все больше удовлетворялся за счет искусственно выращенного жемчуга.

Разводить жемчужниц, а заодно заставить их производить побольше жемчуга мечтали сотни лет и в России. В Петербурге, в Национальной библиотеке хранится написанная в XIX в. рукопись В. Попова. Там сказано, что, по преданию, купцы Строгановы в речке Иксе вблизи Сольвычегодска «воспитывали жемчужные раковины, для чего, по рассказам, держали особого приставника, какого-то иностранного доктора».

После революции архангельский рабочий И.В. Гуттуев организовал несколько экспедиций, целью которых была посадка мелких камушков и песчинок в раковины жемчужниц. К сожалению, этот опыт по повышению продуктивности был не слишком удачным – жемчужины-то образовывались, но они прирастали к раковине. Надо сказать, что и отечественным ученым, несмотря на поддержку со стороны государства, не удалось разработать эффективную методику инициации образования жемчуга. (*рис. 1*)

### «Верный друг и защитник»

Листая старые книги, замечаешь, что огромное внимание к жемчугу удивительным образом уживалось с плохим знанием биологии его «производителя». Долго полагали, что жемчуг – это яйца жемчужниц. Даже в указе Екатерины II от 9 октября 1766 г., посвященном жемчужной ловле, говорится: «Выпущенная из раковины жемчужина ... становится молодой раковиною...».

Между тем, жители Беломорья (хотя и не все) знали, как на самом деле размножается жемчужница. В 1947 г. старый жемчуголов так рассказывал о «верном друге и защитнике жемчужницы»: «...жемчужные моллюски в первые месяцы жизни не имеют еще защитного панциря и в огромных количествах поедаются рыбами, но форель, наоборот, чудесным образом скрывает моллюсков от взоров других рыб. Она прячет их под жабры и носит там на протя-



**Рис. 1.** Экспедиция по изучению жемчужницы в реке Казанка под руководством И.В. Гуттуева в июле 1929 г. Фото из архива Архангельского областного краеведческого музея

жении нескольких месяцев, опуская на дно только тогда, когда вокруг их тел образуются защитные створки раковины» [5].

К тому времени ученые тоже поняли, что личинки жемчужницы (глохидии) обитают некоторое время на жабрах рыб. Но каких рыб – науке было еще неизвестно. В статье профессора В.И. Жадина, вышедшей в том же 1947 г., сказано, что глохидии жемчужницы живут преимущественно на гольяне [1].

Наблюдательность «жемчужных пастухов» и восхищает, и удивляет! Как без микроскопа понять, что крохотные белые крупинки на жабрах маленьких рыбок, похожие на манку – это капсулы, в которых живут глохидии? Но, видимо, обошедшие десятки рек и речек карелы и поморы обратили внимание, что эта «манка» встречается у рыб только на порогах, заселенных жемчужницей.

Современные исследования полностью подтвердили правоту северян – действительно, молодые жемчужницы, хотя и прикрепляются к жабрам разных рыб, выжить и «созреть» могут только на жабрах лососевых – кумжи и атлантического лосося. На Белом море атлантического лосося зовут семгой, а молодь семги и кумжи – форелью.

Атлантический лосось – рыба удивительная. Он рождается в бурных северных речках, а на нагул уходит в океан, но не в Северный Ледовитый, а в более теплый Атлантический (так что не зря этот лосось «атлантическим» зовется!). Вернувшись в родную реку, по осени нерестится. Часть рыб после этого погибает, но некоторые выживают и снова идут в океан. В этом отличие атлантического лосося от его тихоокеанских родственников, которые массово гибнут после нереста.

### **Манипуляция поведением?**

Не так давно была высказана и стала активно пропагандироваться идея о том, что как раз заражение глохидиями жемчужницы и ведет к тому, что атлантический лосось не погибает после нереста, а живет в реке до весны; лишь в этом случае глохидии, закрепившиеся на его жабрах осенью, успевают завершить свое развитие [3]. Экспериментально это предположение не проверяли, анализ особенностей жизненного цикла лососевых рыб в реках, где жемчужница живет и где ее никогда не было, тоже не делали, но зато уже получен эликсир, включающий «экстракт жабр атлантического лосося... активированного естественным путем на продленный жизненный цикл, биомолекулами симбиотических личинок моллюска-жемчужницы». Эликсир рекомендуется использовать для лечения рака и других весьма серьезных заболеваний. Отметим, что между делом тут заявлен и теоретический вывод – о наличии симбиотических отношений между жемчужницей и лососем.

Между тем, хотя атлантический лосось действительно может уйти из реки в море сразу после нереста или остаться в реке до весны, его поведение никак не зависит от наличия или отсутствия жемчужницы в реке [6]. Все определяется местоположением реки: если море у устья не замерзает, лосось уходит из реки осенью, чтобы не голодать там зря (взрослый лосось питается только в море). Если же в устье лед, то лосось будет зимовать в реке, потому что при температурах, близких к замерзанию, в соленой воде он не выживает.

Тихоокеанские лососи – довольно отдаленные родственники атлантического лосося (это разные рода). Но и там, на Дальнем Востоке, есть лососи, которые нерестятся по многу раз за свою жизнь, например, микижа (радужная форель), проходную форму которой не случайно именуют камчатской семгой. Среди предков атлантического лосося не было рыб, массово гибнущих после нереста, и у него этого признака, очевидно, никогда не было. Так что в «лечении» от массовой посленерестовой гибели он не нуждается. (*рис.4 цветной вкладки*).

Более того, паразитологи установили, что гложидии европейской жемчужницы вполне способны прикрепляться к жабрам горбуши, которую вселили в Белое море в 1960-е гг. Однако жизнь переселенцу с Тихого океана это не продляет – после нереста горбуши в беломорских реках (включая Варзугу и Кереть, где обитают крупнейшие в мире популяции жемчужницы) там можно найти только мертвых или погибающих рыб.

Ну и наконец задумаемся о том, могут ли жабры лосося с гложидиями хотя бы в принципе быть лекарством. Наверное, могут. Ведь в тканях очень многих обитатели вод можно найти биологически активные вещества, полезные для человека. Однако целебные свойства тканей животных с их собственной продолжительностью жизни никак не связаны. Например, недавно защищена диссертация, показавшая благоприятное воздействие препарата из молок тихоокеанских лососей на здоровье пожилых людей, хотя, как мы знаем, живут эти рыбы только до первого нереста.

Вопрос о возможности симбиоза европейской жемчужницы и атлантического лосося заслуживает особого внимания. В работе [6] мы приводим ряд аргументов против этой идеи, но наиболее весомым нам кажется «мнение» самого атлантического лосося. А он однозначно оценивает жемчужницу как паразита – при заражения гложидиями жемчужницы у рыб вырабатывает иммунитет против них, и повторное заражение затрудняется очень сильно, выживают только отдельные гложидии. Этот факт установлен как раз В.В. Зюгановым и его коллегами [4]. Да и мы убедились в этом, работая с молодью семги из беломорских рек: по весне жабры годовичков буквально обсыпаны гложидиями, а у двухгодовиков их почти не бывает.

## **Жизнь без конкуренции**

И все-таки у жемчужниц есть одно очень необычное качество. У них очень сильно ослаблена внутривидовая конкуренция, которую Дарвин считал присущей всем живым существам.

В старых книгах описано, как выглядели колонии жемчужниц до нашествия жемчуголовов и загрязнения рек: «раковины лежат одна возле другой ребром так тесно, как на мостовой камни сплочены». Почему? Неужели не требуется моллюскам больше жизненного пространства? Нет, не требуется. Ведь жемчужницы – фильтраторы, а всю воду в реке все равно через себя не пропустишь. А уж где жить – среди гравия или среди сородичей – какая разница?

Вся колония одновременно, едва ли не в один день, выметывает гложидии. И при этом даже гложидии, прикрепившиеся к одному и тому же жаберному лепестку, не конкурируют. Нам удалось выделить ДНК из отдельных гложидиев и определить последовательности их митохондриальной ДНК.

Оказалось, что бок о бок, в жабрах одной и той же рыбы, всю зиму спокойно живут потомки разных особей.

Более того, жемчужницы умудряются избегать даже дарвиновской «борьбы за существование» – у них практически нет естественных врагов. Ими питается выдра, но она, видимо, собирает всех особей, обитающих на небольшой глубине, шансов спастись нет ни у кого из них. Так, жемчуголов Келеваев в молодости пытался поселить жемчужницу в небольшой ручей Святой на острове Великом, однако выдра быстро расправилась со всеми переселенцами.

С неблагоприятными условиями среды жемчужница тоже практически не сталкивается, а уж если столкнется, то это – неминуемая катастрофа с летальным исходом. В юности моллюска ограждает от неприятностей внешнего мира «верный друг и защитник». Да и позже относительно благоприятная среда ей обеспечена – ведь ее требования к условиям обитания примерно те же, что и у рыбы-хозяина: раз уж он живет в реке – выживет и она.

Конечно, бывают неприятности – летом уровень воды в ручье может упасть, а зимой – придавить лед. Но здесь жемчужницам помогает небывалая выносливость. Разгадывая «тайны» долголетия жемчужниц, В.В. Зюганов [2] отрезал им кусочки ноги и мантии, сифоны, протыкал ногу, перерезал жабры, однако несчастные моллюски не смогли пережить только разбивания раковин и перерезки ног и мускулов-замыкателей.

Так что жемчужницы вступают в серьезную борьбу за существование только один раз, в самом начале жизни, когда глохийдий должен достичь жабр лососевой рыбы и закрепиться на них. Но как только это событие свершается, жизнь молодого моллюска идет уже по отработанному за миллионы лет сценарию. На первом этапе – рост под защитой «хозяина», затем – под защитой грунта, а дальше – под защитой мощной раковины.

Посмотреть на вид, не вступающий в борьбу за существование, популяционному биологу не менее интересно, чем физиологу наблюдать организм в невесомости. Это уникальная возможность проверить, насколько прав был Дарвин и его многочисленные последователи, считающие борьбу за существование основой теории эволюции.

Предполагается, что в ходе борьбы за существование разные популяции одного вида адаптируются к разным условиям обитания, и как следствие, в них начинают преобладать разные варианты генов, влияющих на признаки, важные для выживания в конкретных условиях. И даже в одной популяции появляются генетически различающиеся особи, использующие разные адаптивные стратегии (по-разному окрашенные, быстро и медленно растущие, агрессивные и спокойные). Формируется, по терминологии С.М. Гершензона, «мобилизационный резерв»: при изменении условий среды велик шанс, что особи хоть с одним из множества генотипов выживут, и вид сохранится.

### **Эволюционирует ли жемчужница?**

Похоже, ослабление борьбы за существование и в самом деле сильно повлияло на экологию и эволюцию жемчужниц! Как отмечают немецкие исследователи [10], к жемчужницам и их ближайшим родственникам неприменимо широко распространенное положение об альтернативных r- и K-стратегиях

(типичный г-стратег – быстро размножающийся, относительно мелкий и коротко живущий вид; типичный К-стратег – медленно размножающийся, относительно крупный и долго живущий вид). Жемчужницы очень плодовиты и размножаются до самой смерти, но живут долго и достигают крупных для моллюска размеров. Конечно, они не единственное, но довольно яркое исключение из экологического правила.

Как обычно распределен вид по своей области распространения? Наиболее многочисленные популяции обитают в центре ареала, поскольку условия для особей этого вида там, как правило, наилучшие. В отличие от этих «счастливиц», популяции на краях ареала все время балансируют на грани вымирания. Жемчужница и здесь «поступает по-своему» – крупнейшая в мире популяция, обитающая в реке Варзуга, находится на самом краю ареала вида. Создается впечатление, что у нее действительно отсутствует «мобилизационный резерв», ведь даже к условиям соседней реки она не может приспособиться.

Отсутствие какого-либо генетического разнообразия по устойчивости к неблагоприятным факторам среды хорошо проявляется, когда на берегах водоемов, заселенных жемчужницей, появляются люди, не желающие думать об охране природы. Однажды нам довелось обследовать ручей Жемчужный на Карельском берегу Белого моря. В результате незаконной вырубке леса в верховьях ручья вся популяция жемчужницы (сотни особей) в этом водоеме погибла, ни один моллюск не выжил.

Особенно яркий пример – одна из рек Ленинградской области, хорошо изученная нашими коллегами [13]. В ее верхней части обнаружены только разрушенные раковины жемчужниц, погибших, видимо, от какого-то катастрофического изменения условий среды, связанного с деятельностью человека. Однако в нижней части реки живут и воспроизводятся многочисленные колонии этого вида. Резкая граница между колониями и участком, лишенным жемчужниц, которую показали нам петербургские коллеги, поражает. У подавляющего большинства видов наблюдался бы в этом случае более или менее постепенный градиент плотности поселений от верхнего, измененного, к нижнему, относительно «дикому» участку.

Конечно, эволюция у европейской жемчужницы все же идет – но по единственному признаку. Как уже можно догадаться, ею движет только стремление закрепиться на рыбе-хозяине и выжить. Норвежские коллеги на конференциях в Петрозаводске и Португалии представили доклады, показывающие, что популяции жемчужницы адаптированы к обитанию либо на атлантическом лососе, либо на кумже – на непривычном хозяине глохидии не выживают. Так что Дарвин был прав – только борьба за существование, вызывающая естественный отбор, движет эволюцию!

Жемчужница может служить живой (пока) иллюстрацией к словам И.И. Шмальгаузена [9, стр. 17]: «Все консервативные группы организмов относятся к <...> оседлым и даже сидячим, пассивным формам, частью защищенным скелетными образованиями, живущими в ограниченных и мало изменившихся условиях, главным образом, морской жизни». Это явление он назвал «иммобилизацией», то есть, отсутствием «мобилизационного резерва».

## Принцесса Севера

Учитывая чувствительность жемчужницы к внешним воздействиям (так и хочется сказать, «капризность»), необходимо уделять охране этого вида значительное внимание. Ведь эта «принцесса на горошине» не только важный компонент экосистем, она – существенный элемент культуры Русского Севера, часть истории поморов, карелов и саамов!

До XX в. основной причиной сокращения численности жемчужницы в России был хищнический промысел. В XX в. промысел прекратился, но мероприятия по индустриализации нашей страны (развитие лесосплава, постройка ГЭС на нескольких крупных реках, загрязнение от химических комбинатов) привели к гибели некоторых популяций. Сейчас во многих реках жемчужница не может размножаться из-за отсутствия семги и кумжи, которых подцистую вылавливают браконьеры.

Однако, вопреки сложившемуся в нашем сознании стереотипу, объективный анализ показывает, что состояние жемчужниц в российских реках лучше, чем в западной Европе. Из 350 млн европейских жемчужниц более 143 млн, по нашим подсчетам ([12], живет в России. И дело не только в меньшей плотности населения на территории нашей страны. В южной Финляндии уцелело только две популяции жемчужницы [14], а в соседней Ленинградской области, по подсчетам наших коллег [13] – минимум семь. А ведь в Ленинградской области вместе с Петербургом живет больше жителей, чем во всей Финляндии!

Пример жемчужницы не уникален. Из замечательной книги профессора И. Хански [8] можно узнать, что наши соседи уже забывают, как выглядят естественные леса, что быстро исчезают те виды животных, которые обитают в Западной Европе, что защитникам природы очень трудно противостоять компаниям, строящим плотины. Отечественная сеть заповедников и заказников, водоохранные зоны, хоть и поредевшие от незаконной вырубki – огромное преимущество нашей природоохранной системы.

Конечно, радоваться нам рано. Как и в Западной Европе, численность жемчужницы во многих российских реках сокращается. Поэтому очень важно бороться с загрязнением рек, нужно охранять и восстанавливать популяции рыб-хозяев, которые носят на своих жабрах личинок жемчужницы – семги и кумжи.

Настало время и для того, чтобы освоить на рыбоводных заводах искусственное разведение жемчужницы, тем более что такие методики разработаны [4], а рыбоводы готовы выращивать жемчужниц. Кстати, как показывают наши исследования, и сейчас на некоторые рыбоводные заводы с водой из рек «нелегально» попадают глосидии, поселяющиеся на «заводской» молоди семги и кумжи. Так что, порой сами не подозревая об этом, заводы уже помогают разводить жемчужницу. (*рис.5 цветной вкладки*).

С помощью моллюсков, выращенных искусственно или перевезенных из Керети, можно было бы восстановить жемчужницу в реках, где она исчезла. Это, в частности, река Нильма. В XIX в. там был жемчужный промысел. В XX в., после интенсивного лесосплава, жемчужница исчезла, но семга и кумжа в реке выжили. По нашим наблюдениям, в тех сплавных реках, где популяции жемчужницы выжили в притоках, сейчас началось восстановление популяций и в основном русле, то есть, реки вновь стали пригодны для жизни жемчужниц.

Сейчас на побережье Белого моря интенсивно развивается экологический туризм, становятся популярными погружения с аквалангом; поэтому восстановленные колонии жемчужницы могли бы стать объектом посещения организованных экскурсий. Будем надеяться, что профессия «жемчужного пастуха» возродится!

## Литература

1. Жадин В.И. 1947. // Труды 1-й научно-технической конференции по рыбной промышленности Карело-Финской ССР. Октябрь 1945 г. – Петрозаводск. – С. 301–307.
2. Зюганов В.В. 2003. // Объединенный научный журнал. № 7. – С. 68–83.
3. Зюганов В.В. 2005. // Изв. РАН. Сер. биол. – № 4. – С. 435–441.
4. Зюганов В.В., Зотин А.А., Третьяков В.А. 1993. Жемчужницы и их связь с лососевыми рыбами. М.: Ин-т биологии развития РАН. – 134 с.
5. Иноземцев А. 1947. // На рубеже. – № 4. – С. 30–33.
6. Махров А.А., Болотов И.Н. 2010. // Успехи геронтологии. – Т. 23, № 3. – С. 382–391.
7. Фарн А. Жемчуг: натуральный, культивированный и имитации. – М.: Мир. – 1991. – 192 с.
8. Хански И. Ускользящий мир: Экологические последствия утраты местообитаний. – 2010. – М.: Т-во научных изданий КМК. – 340 с.
9. Шмальгаузен И.И. 1945. // Журн. общ. биол. – Т. 6, № 1. – С. 3–25.
10. Bauer G., Wächtler K. 2001. // Ecological studies. – V. 145. – P. 383–388.
11. Howard J.K., Cuffey K.M. 2006. // Freshwater Biology. – V. 51. – P. 460–474.
12. Makhrov A., Bepalaya Ju., Bolotov I. et al. // Hydrobiologia (in press).
13. Ostrovsky A.N., Popov I.Yu. 2011. // Aquatic Conserv: Mar. Freshw. Ecosyst. – V. 21. – P. 113–121.
14. Oulasvirta P. 2011. // Toxicological & Environmental Chemistry. – V. 93. Iss. 9. – P. 1713–1730.

# Много оленей, хороших... но разных!

И.А. Володин, Е.В. Володина

**Володин Илья Александрович,**  
кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник биологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Руководитель проекта РФФИ 12-04-00260а «Структурные особенности и функциональное значение внутривидовой изменчивости вокального поведения животных».

**Володина Е.В.,**  
кандидат биологических наук, научный сотрудник отдела научных исследований Московского зоопарка. Исполнитель проекта РФФИ 12-04-00260а.

Современные благородные олени представляют собой удивительную мозаику из подвидов и их гибридов, в которой непросто разобраться ни ученым, ни охотникам, ни просто любителям этих замечательных животных. Благородные олени возникли в Центральной Азии около двух миллионов лет назад, обособившись от лани и пятнистого оленя [1,2]. Из центра своего происхождения олени разошлись двумя мощными ветвями. Западная ветвь через Кавказ и Карпаты распространилась по всей Европе, а восточная перешла Тянь-Шань и расселилась по всей Сибири и Северной Америке. Но из центра происхождения ушли не все олени. Бухарский подвид остался и живет по сей день по берегам рек Средней Азии.

Кроме естественных перемещений, люди на протяжении уже нескольких веков переселяют оленей с места на место. Многие популяции были истреблены. Для их восстановления часто завозили совсем других оленей, непохожих и неродственных тем, что раньше обитали в этих местах [3]. Не все такие перемещения были отмечены в исторических документах, поэтому происхождение многих современных благородных оленей остается неизвестным.

В настоящее время благородных оленей разных подвидов разводят во

множестве на фермах и в охотничьих хозяйствах Европы, Казахстана, Сибири и Средней Азии. Поэтому заповедники, охотуголья, природные парки и зоопарки России могут получать оленей из самых разных мест. Все хозяйства хотят завозить хороших оленей. Но что значит хороших? Ведь недостаточно сказать, к примеру, вот это хорошая лошадь. Все равно спросят, а что это за лошадь? Какой она породы? И хотя пород благородных оленей не существует, они бывают очень разные, несмотря на то, что относятся к одному виду. А из-за многочисленных перемещений и гибридизации подвидов теперь уже недостаточно знать место, откуда прибыли олени. Нужно научиться их различать.

Как распознавать подвиды благородных оленей? Раньше это можно было сделать только по внешнему виду и форме рогов. Сейчас добавились еще и другие способы: генетический и биоакустический.

### **Как распознать оленей восточной, западной и центральной ветвей?**

По внешнему виду, размерам и рогам. Олени трех ветвей различаются по внешнему виду и размерам (*рис.1 цветной вкладки*).

Восточные олени по большей части очень крупные и с густой шейной гривой. Однако среди них есть и мелкий подвид, калифорнийский карликовый вапити. Рога у восточных оленей большие, пара может весить до 9 кг. Отростков до 6–7, из которых самый большой – четвертый, у основания которого ствол рога резко отгибается назад [4,5].

Западные олени также бывают крупными (карпатский, шведский, средне-европейский), а также могут быть средних размеров (испанский и шотландский), или небольших (корсиканский и варварийский олени). Рога у западных оленей среднего размера, вес пары, как правило, не больше 7 кг, хотя современные технологии кормления позволяют выращивать гораздо более тяжелые рога. Число отростков может достигать 12–16, и в конечной части рога они образуют кустообразную корону [5]. У южных подвидов западных оленей гривы не бывает, а у северных она есть. Однако нет никакой гарантии, что у южных представителей западных оленей грива не вырастет после перемещения их в северные широты. Также и размеры оленей, по-видимому, могут меняться в зависимости от климата той местности, куда их перевезли. Так, олени шотландского подвида, вывезенные в Новую Зеландию, через несколько поколений подросли чуть ли не на голову.

Центральные (бухарские) олени довольно крупные и не имеют шейной гривы. Вес пары рогов обычно не превышает 5 кг. Как правило, рога имеют не более 5–6 отростков, а корона отсутствует. Но это редкий охраняемый подвид благородного оленя, и за пределами Средней Азии бухарских оленей можно встретить разве что в зоопарках.

**По генетике.** Принадлежность оленя к восточной, западной или центральной ветви можно установить как по ядерной, так и по митохондриальной ДНК [1,6,7]. Для генетических анализов у оленя необходимо взять образцы крови либо шерсти с волосяными луковицами. Может подойти и порошок, полученный при распиливании кусочка рога.

Европейские олени генетически исследованы лучше других усилиями четырех научных групп: норвежской [8], немецкой [9], польской [10] и россий-

ской [11]. Оказалось, что западные олени относятся к нескольким гаплотипам митохондриальной ДНК, которые обозначают латинскими буквами «А», «В» и «С». Как возникли эти гаплотипы?

Последнее оледенение отодвинуло область распространения оленей в Европе далеко на юг. В течение этого ледникового периода они оставались только в трех небольших изолированных поселениях: южной Испании, в Италии и на Балканах. Когда же 12 тыс. лет назад ледник начал таять и отступать, олени стали вновь расселяться по Европе.

Три этих поселения и дали начало трем гаплотипам. Олени гаплотипа «А» из Испании начали двигаться к центру и на север Европы, образовав шотландский, шведский и норвежский подвиды. Олени гаплотипа «В» из Италии образовали корсиканский подвид островов Сардинии и Корсики и варварийский подвид севера Африки. Олени гаплотипа «С» с Балканского полуострова дали начало восточноевропейскому и карпатскому подвидам, а затем на севере Германии и Польши смешались с оленями гаплотипа «А».

Четвертый, пока еще безымянный, гаплотип, который, вероятно, назовут «D», был недавно обнаружен у оленей, вывезенных из Германии в Воронежский заповедник и оттуда расселенных по всей центральной России [11]. Этот новый гаплотип в равной степени отличается как от гаплотипа «А», так и от гаплотипа «С».

**По голосу самцов.** Западная, центральная и восточная ветви оленей хорошо различаются по гонным крикам самцов. Впервые такой способ биоакустической диагностики благородных оленей был предложен А.А. Никольским с соавторами в 1979 г. [12]. Самцы западной ветви режут низким глубоким басом, а все восточные кричат высоким пронзительным дискантом. Центральные олени бухарского подвида способны и на рев, и на дискант, и даже на двухголосый аккорд, ревом и дискантом одновременно [2].

Рев и дискант очень хорошо различаются на слух. Также, различия между ними очевидны, если сравнить изображения этих звуков, выведенные на экран компьютера (*рис. 1*). Такие изображения несложно построить любому пользователю компьютера с помощью программ для визуализации звуков, как профессиональных, так и бесплатных, которые можно найти в Интернете.

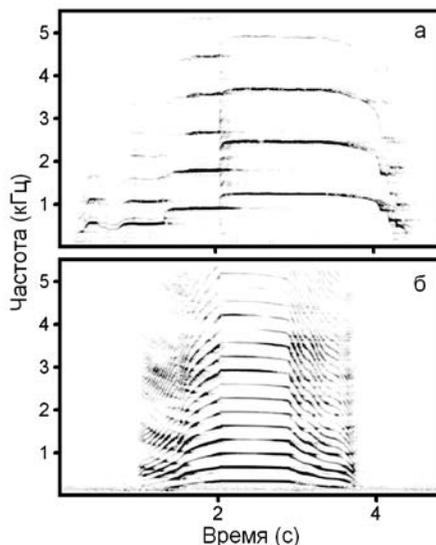
Крики самцов разных подвидов в пределах западной ветви тоже хорошо различаются между собой, хотя неожиданным образом. Миниатюрный корсиканский олень кричит очень низким голосом, а более крупные шотландский и восточноевропейский подвиды – намного выше [13,14]. Мы обнаружили, что неразличимые по генетике испанские и шотландские олени могут прекрасно распознаваться по крикам самцов [15]. Так что в этом случае биоакустические маркеры подвида оказываются надежнее генетических! Возможно, период в 12 тыс. лет, за который испанский и шотландский подвиды разошлись со времени последнего европейского оледенения, оказался слишком короток для того, чтобы отразиться в митохондриальной ДНК. Однако этого времени оказалось достаточно для сильных изменений в звуках гонного рева самцов.

**По гонному поведению.** Самцы западных оленей во время гонных ревов оттягивают свой кадык очень сильно вниз, до самой грудины, в то время как самцы восточных оленей способны оттянуть его только до середины шеи [16]. Это связано с длиной особой растяжимой ткани – лигамента, на которой за-

креплен кадык, и которая при крике тянется, как резинка. У восточных оленей лигамент короче, чем у западных. Особенно хорошо смещение кадыка вниз при крике заметно у оленей без шейной гривы. Но и при мохнатой шее бывает видно, как кадык после окончания крика рывком взлетает вверх, словно отпущенная пружина, и возвращается на свое обычное место вверху шеи. Лучше всего это можно увидеть на видеозаписях кричащих оленей, снятых в профиль, особенно если просматривать их кадр за кадром.

Среди подвидов западных оленей гонное поведение самцов тоже может различаться. К примеру, самцы испанского подвида во время гонных ревов часто высовывают язык, как будто дразнятся. Зачем они это делают, непонятно, поскольку, по нашим данным, на звуки высунутый язык практически не влияет. Возможно, это помогает избежать перегрева в жарком климате Испании [15]. Однако по нашим наблюдениям, ни один другой подвид, даже бухарский, который тоже живет в жарком климате, во время гонных криков язык не высовывает.

По голосу самок и телят. Половина генов в потомков следующего поколения передается от самок, поэтому очень важно знать также происхождение самок. Самки благородных оленей часто кричат при общении с оленятами. Различия между звуками западных и восточных самок столь же велики, как между ревом и дискантом западных и восточных самцов [17]. У западных самок голос такой же низкий, как рев западных самцов, а у восточных самок голос такой же высокий, как дискант восточных самцов (рис. 2). Самые низкие крики у самок корсиканского подвида, также как у корсиканских самцов [14]. Однако у самок любых подвидов звуки обычно намного короче и тише, чем звуки самцов.



**Рис. 2.** Компьютерные изображения звуков а) дисканта самца сибирского марала (восточная ветвь), и б) рева самца испанского оленя (западная ветвь). Как и у людей, у оленей звуки производятся с помощью парных голосовых связок, расположенных в гортани, которые колеблются с частотой несколько сотен или тысяч раз в секунду. Эта частота носит название основной частоты звука и измеряется в Герцах (1 Гц=1 колебание в секунду). На изображениях звуков – спектрограммах, показывающих зависимость частоты звука от времени, – частота колебаний голосовых связок прорисована в виде самой нижней в стопке лежащих друг над другом полос. Звуки и видео кричащих оленей можно послушать и посмотреть на сайте [http://www.bioacoustica.org/gallery/mammals\\_rus.html#cervus](http://www.bioacoustica.org/gallery/mammals_rus.html#cervus)

По большей части самки и оленята кричат, когда их на время разлучают для проведения различных зоотехнических процедур, к примеру, взвешивания, дойки, ветеринарного осмотра или специально для проведения для научных исследований. Еще бывает, что самки начинают кричать друг на друга при соперничестве за особо лакомый корм у кормушек. Отделенные от матери оленята кричат довольно часто, что позволяет использовать звуки для уточнения их принадлежности к западной или восточной ветви оленей. Крики телят любого из западных подвидов ниже, чем крики взрослых любого восточного подвида. Представьте себе такого басистого западного малютку на фоне писков восточных телят и дисканта взрослых восточных оленей!

#### ***Как записывать звуки оленей.***

Записать звуки оленей можно вручную, на цифровой магнитофон (рекордер) с микрофоном или же в автоматическом режиме. Запись в автоматическом режиме имеет свои дополнительные преимущества. Поскольку она проходит без присутствия рядом человека, это не беспокоит животных и не влияет на их активность. Приборы (звуковые ловушки) устанавливают до гона, а после гона снимают. Помимо записи звука, они одновременно регистрируют также и температуру воздуха. Такие приборы работают в полностью автономном режиме до 3 месяцев без смены батарей, в любую погоду – и в снег, и в дождь. Это позволяет составить расписание гона в данном конкретном уголке и выделить точки, где олени собираются на гон. Такие приборы для автоматической записи звука уже отлично показали себя при записи свободноживущих испанских оленей в условиях разреженных равнинных дубрав южной Испании [17]. Кроме того, авторы статьи успешно опробовали такой метод оценки динамики рева и в России, для сибирских маралов в горной тайге Хакасии (*рис.2 цветной вкладки*).

### **Как распознать гибридов между западными и восточными оленями?**

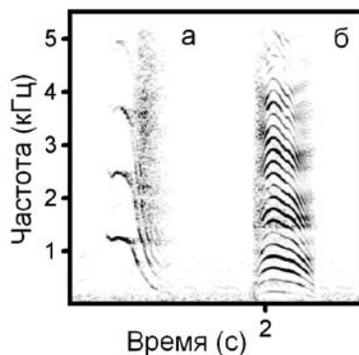
Европейских оленей неоднократно скрещивали с американским вапити, с целью увеличения размеров рогов у потомства. Поскольку в результате рога не увеличивались, от этих попыток постепенно отказались [19]. Но по историческим хроникам известно, что в 14 парковых охотничьих хозяйствах Англии неоднократно скрещивали шотландских оленей с американскими вапити. Однако в ядерной ДНК современных оленей из этих хозяйств от вапити не осталось и следа [20].

Вымывание признаков вапити у гибридов подтверждает и наш экспресс-анализ нескольких гонных звуков из английского оленьего парка Вобурн. Все эти звуки представляли собой ревы без каких либо признаков дисканта восточных оленей, хотя про этих оленей было известно, что несколько поколений назад они гибридизировали с вапити.

Почему же у современных шотландских оленей не обнаруживают признаков гибридизации с вапити? Прежде всего, для генетических анализов использовали Y-хромосому, которая передается только от отца к сыну [20]. Так что не исключено, что признаки вапити могли все же передаваться, но по материнской линии. Кроме того, возможно, что, хотя самцы вапити и крупнее, местные шотландские самцы активнее и агрессивнее. Так что аборигены могли монополизировать боль-

шинство спариваний с самками, практически выключая вапити из размножения. Кроме того, в условиях сырого английского климата у вапити начинаются болезни копыт, которые тоже понижают их жизнеспособность [20].

Сейчас в среднюю полосу России из восточных оленей попадают преимущественно не американские вапити, а сибирские маралы. Хотя результаты длительного содержания сибирских маралов в средней полосе России еще нигде не опубликованы, вполне возможно, что относительно сухой климат этого региона может оказаться для них подходящим. Также и гибриды сибирского марала с европейскими подвидами могут в этом климате оказаться жизнестойкими. Изменяются ли крики у перемещенных маралов? Как будут кричать гибриды? Пока мы этого не знаем. Авторы статьи с интересом примут участие в таких исследованиях.



**Рис. 3.** Компьютерное изображение криков а) самки сибирского марала (восточная ветвь), и б) самки испанского оленя (западная ветвь)

### Как различать гибриды между западными подвидами?

Звуки гибридов между европейскими подвидами также пока не изучены. Наши предварительные данные показывают, что гибридные самцы шотландского-восточноевропейского происхождения кричат очень сильно различающиеся гонные звуки. Одни кричат похоже на один родительский подвид, другие на другой, третьи издают промежуточные звуки. В то же время, полученные нами данные по самцам испанского подвида говорят о том, что в пределах подвида вариации в гонных криках минимальны. Звуки испанских самцов из четырех различных заповедников южной Испании, разделенных расстоянием в 100–150 км, и звуки, записанные на самой большой в Европе экспериментальной оленьей ферме университета Кастилия Ла-Манча, оказались удивительно похожими друг на друга, как по звучанию, так и по всем измеренным акустическим параметрам [15,17].

Возможно, ярко выраженная нестабильность рева разных самцов может быть первым свидетельством их гибридного происхождения. Но это пока лишь догадки. Для того чтобы установить, как действительно наследуются признаки звуков у благородных оленей, нужны исследования рева гибридов известного происхождения.

### Как различать гибриды между западными подвидами?

Звуки гибридов между европейскими подвидами также пока не изучены. Наши предварительные данные показывают, что гибридные самцы шотландского-восточноевропейского происхождения кричат очень сильно различающиеся гонные звуки. Одни кричат похоже на один родительский подвид, другие на другой, третьи издают промежуточные звуки. В то же время,

полученные нами данные по самцам испанского подвида говорят о том, что в пределах подвида вариации в гонных криках минимальны. Звуки испанских самцов из четырех различных заповедников южной Испании, разделенных расстоянием в 100–150 км, и звуки, записанные на самой большой в Европе экспериментальной оленьей ферме университета Кастилия Ла-Манча, оказались удивительно похожими друг на друга, как по звучанию, так и по всем измеренным акустическим параметрам [15,17].

Возможно, ярко выраженная нестабильность рева разных самцов может быть первым свидетельством их гибридного происхождения. Но это пока лишь догадки. Для того чтобы установить, как действительно наследуются признаки звуков у благородных оленей, нужны исследования рева гибридов известного происхождения.

### **Как распознать гибридов между благородным и пятнистым оленем?**

Олени европейских подвидов способны скрещиваться не только с американскими вапити и сибирскими маралами, но даже со своими более отдаленными родичами – пятнистыми оленями. По данным исследований, проведенных в Англии, известно, что в тех случаях, когда пятнистые и благородные олени сосуществуют вместе на одной территории, то примерно одно из 500 спариваний будет происходить между пятнистым и благородным оленем [9]. Получающиеся в результате гибриды способны размножаться дальше и засоряют популяцию благородного оленя чужеродными генами.

Эта проблема была осознана уже давно. В 1998 г. группа английских исследователей под руководством А.М. Лонга опубликовала статью по определению гибридов между пятнистым и благородным оленями по гонным крикам самцов [21]. Ученые сравнили звуки самцов благородных оленей, пятнистых оленей и их гибридов, и обнаружили, что звуки метисов обличаются от обеих чистых форм. Безусловно, гибридных особей между пятнистым и благородным оленем можно распознать также и генетически. Однако для этого оленя придется поймать и взять у него образцы ДНК для последующих лабораторных исследований. Это не всегда возможно со свободноживущими оленями, поэтому биоакустический метод для поиска и выбраковки таких гибридных самцов во время гона может оказаться предпочтительней. Однако звуки гибридных самок до настоящего времени совершенно не изучены. И это еще одно из перспективных направлений наших дальнейших исследований.

### **Литература**

1. Mahmut H., Masuda R., Onuma M. et al. Molecular phylogeography of the red deer (*Cervus elaphus*) populations in Xinjiang of China: Comparison with other Asian, European, and North American populations // *Zool. Sci.* – 2002. – V. 19. – P. 485–495.
2. Volodin I.A., Volodina E.V., Frey R. et al. Spectrographic analysis points to source-filter coupling in rutting roars of Iberian red deer // *Acta. Ethol.* – 2013. – V. 16. – P. 57–63.
3. Nussey D.H., Pemberton J., Donald A. et al. Genetic consequences of human management in an introduced island population of red deer (*Cervus elaphus*) // *Heredity.* – 2006. – V. 97. – P. 56–65.

4. Федосенко А.К. Марал (экология, поведение, хозяйственное значение). Алмата: Наука. – 1980. – 200 с.
5. Штарев Ю.Ф. Результаты акклиматизации марала в Мордовской АССР // Труды Мордовского государственного заповедника им. П.Г. Смидовича. – Вып. 5. – Саранск. – 1970. – С. 137–170.
6. Ludt C.J., Schroeder W., Rottmann O. et al. Mitochondrial DNA phylogeography of red deer (*Cervus elaphus*) // Mol. Phylogenet. Evol. – 2004. – V. 31. – P. 1064–1083.
7. Meredith E.P., Rodzen J.A., Banks J.D. et al. Microsatellite analysis of three subspecies of elk (*Cervus elaphus*) in California // J. Mammal. – 2007. – V. 88. – P. 801–808.
8. Skog A., Zachos F.E., Rueness E.K. et al. Phylogeography of red deer (*Cervus elaphus*) in Europe // J. Biogeogr. – 2009. – V. 36. – P. 66–77.
9. Zachos F.E., Hartl G.B. Phylogeography, population genetics and conservation of the European red deer *Cervus elaphus* // Mammal. – Rev. 2011. – V. 41. – P. 138–150.
10. Niedzialkowska M., Jedrzejewska B., Honnen A.C. et al. Molecular biogeography of red deer *Cervus elaphus* from Eastern Europe: insights from mitochondrial DNA sequences // Acta Theriol. – 2011. – V. 56. – P. 1–12.
11. Кузнецова М.В., Данилкин А.А., Холодова М.В. Филогеография благородного оленя (*Cervus elaphus*): данные анализа полиморфизма митохондриального гена цитохрома b // Известия РАН, Серия биол. – 2012. – № 4. – С. 391–398.
12. Никольский А.А., Переладова О.Б., Рutowская М.В. и др. Географическая изменчивость признаков брачного крика самцов настоящих оленей // Бюллетень МОИП, отдел биол. – 1979. – Т. 84, вып. 6. – С. 46–55.
13. Reby D., McComb K. Anatomical constraints generate honesty: acoustic cues to age and weight in the roars of red deer stags // Anim. Behav. – 2003. – V. 65. – P. 519–530.
14. Kidjo N., Cargnelutti B., Charlton B.D. et al. Vocal behaviour in the endangered Corsican deer: description and phylogenetic implications // Bioacoustics. – 2008. – V. 18. – P. 159–181.
15. Frey R., Volodin I., Volodina E. et al. Vocal anatomy, tongue protrusion behaviour and the acoustics of rutting roars in free-ranging Iberian red deer stags (*Cervus elaphus hispanicus*) // J. Anat. – 2012. – V. 220. – P. 271–292.
16. Frey R., Riede T. The anatomy of vocal divergence in North American elk and European red deer // J. Morphol. – 2013. – V. 274. – P. 307–319.
17. Volodin I.A., Matrosova V.A., Volodina E.V. et al. Sex and age-class differences in calls of Iberian red deer during the rut: reversed sex dimorphism of pitch and contrasting roars from farmed and wild stags // Acta Theriol. in press.
18. Volodin I.A., Volodina E.V., Frey R. et al. Vocal activity and the acoustic structure of the rutting calls of Siberian elk (*Cervus elaphus sibiricus*) and their imitation with a hunting luring instrument // Russian J. Theriol. in press.
19. Hartl G.B., Zachos F., Nadlinger K. Genetic diversity in European red deer (*Cervus elaphus* L.): anthropogenic influences on natural populations // C.R. Biol. – 2003. – V. 326. – P. 37–42.
20. Perez-Espona S., Perez-Barberia F.J., Pemberton J.M. Assessing the impact of past wapiti introductions into Scottish Highland red deer populations using a Y chromosome marker // Mammal. Biol. – 2011. – V. 76. – P. 640–643.
21. Long A.M., Moore N.P., Hayden T.J. Vocalizations in red deer (*Cervus elaphus*), sika deer (*Cervus nippon*), and red × sika hybrids // J. Zool. – 1998. – V. 224. – P. 123–134.

# Оболочки пыльцевых зерен. Что они говорят о вымерших предках современных растений

Н.Е. Завьялова

*Наталья Евгеньевна Завьялова,  
кандидат биологических наук, за-  
ведующая лабораторией палеобота-  
ники Палеонтологического инсти-  
тута им. А.А.Борисяка РАН.  
Проект РФФИ № 13-04-11510*

Растительность прошлых эпох значительно отличалась от современной. Чем глубже в прошлое, тем эти отличия значительнее. Составить представление о растении, которое уже никогда не встретится живым, – интересная и сложная задача. В ископаемом состоянии растения сохраняются в виде разрозненных остатков, таких как отпечатки листьев, шишки, окаменевшие стволы, дисперсные (излученные из геологической породы) пыльцевые зерна и др. Палеоботанику нужно распознать среди набора разнородных растительных фоссилий части, принадлежавшие некогда растениям одной и той же таксономической группы, и воссоздать облик вымершего растения.

Многие таксоны растений исчезли полностью. От некоторых, когда-то насчитывавших многочисленные роды и виды и игравших значительную роль в растительном покрове, в современном мире сохранились немногие или даже всего один представитель.

Об одной из таких групп голосеменных растений – цикадовых – и пойдет речь (*рис. 1*). Цикадовые (саговниковые) – одни из частых и характерных членов триасовых и юрских флор всего мира. Встречались они и в меловое время. Позднее, с



**Рис. 1.** Общий вид современного *Sucas* sp. (фото С.В.Полевой)

окончанием мезозойской эры и началом кайнозойской их значение неуклонно снижается. В настоящее время группа насчитывает 12 родов и около 300 видов, произрастающих в тропиках и субтропиках [7]. Из-за значительного возраста группы современные цикадовые можно было бы назвать живыми ископаемыми. Однако такая метафора подразумевает неизменность живого ископаемого со времен его возникновения, что едва ли верно. Любые группы современных растений имеют свою эволюционную историю. Цикадовые интересны с той точки зрения, что позволяют проследить их эволюцию на протяжении очень длительного периода времени, вплоть до современных потомков давно исчезнувших первых цикадовых.

Провести сравнение между первыми и последними членами эволюционной цепочки, выявить промежуточные звенья этой последовательности – еще одна важная задача палеоботанического исследования. При этом палеоботаник должен не ошибиться и верно распознать, действительно ли имеющиеся в его распоряжении растительные остатки принадлежали группе, эволюцию которой решено реконструировать.

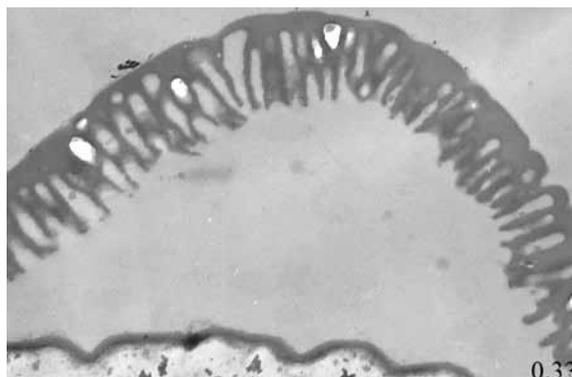
Палеопалинология – раздел науки, изучающий ископаемые пыльцевые зерна и споры, – успешно помогает в этой работе [1]. Хотя в ископаемом состоянии сохраняется лишь наружная (спорополлениновая) часть оболочки пыльцевого зерна, а внутренняя часть оболочки и протопласт утрачиваются, именно к наружной оболочке (экзине) относятся практически все признаки, позволяющие

соотнести пыльцевое зерно с материнским растением. Морфологическое разнообразие пыльцевых зерен обычно позволяет определить, к какому семейству принадлежит материнское растение, часто, к какому роду, иногда – виду.

Тем не менее, наряду со многими успешными случаями весьма детального определения принадлежности по палиноморфологическим данным, известны примеры, когда пыльцевые зерна неродственных крупных групп весьма сходны между собой, и по внешней морфологии – признакам, различимым в световой микроскоп, – не удается различить не только семейства, но даже и порядки растений. Например, при рассмотрении в световой микроскоп не отличить пыльцевые зерна гинкговых от пыльцевых зерен беннеттитовых и цикадовых. Все эти пыльцевые зерна (в дегидратированном и в ископаемом состоянии) выглядят овальными, лодочковидными, с одной дистальной бороздой, с гладкой или неотчетливой скульптурой. Между тем, разграничение между этими группами крайне желательное для описанной выше задачи.

Насколько можно судить по имеющимся немногим данным, в отличие от единообразной внешней морфологии, ультраструктура экзины (внутреннее строение спорополлениновой оболочки пыльцевых зерен) этих групп многообещающе разнообразна. Ее изучение с применением трансмиссионного электронного микроскопа (ТЭМ) позволит более точно реконструировать ископаемые растения. А поскольку ультраструктуру экзины можно изучать и у современных, и у ископаемых растений – для этого используется практически одна и та же методика [2] – можно проводить корректные сравнения между ныне живущими и вымершими представителями групп на основе палиноморфологических данных. Эта идея была одной из ключевых при выполнении гранта РФФИ по изучению генеративных органов мезозойских представителей цикадовых, беннеттитовых и гинкговых. Наше исследование ископаемых цикадовых дало неожиданные результаты, особенно в сравнении с данными по современным представителям.

Современные цикадовые производят небольших и средних размеров пыльцевые зерна, овальные в дегидратированном состоянии. Апертура – участок оболочки, имеющий особое строение и служащий для регуляции



**Рис. 2.** *Ceratozamia mexicana*, удлиненно-ячеистая эктэкзина, поперечный срез [8]

объема пыльцевого зерна и для прорастания гаметофита – обычно описывается как дистальная борозда – удлиненных очертаний утонченный участок экзины на дистальной полусфере пыльцевого зерна. У некоторых представителей апертура имеет округлые, а не удлиненные очертания, и может быть описана как протяженная пора.

Экзина современных цикадовых очень характерна.

Она состоит из следующих слоев снаружи конутри. Под сплошным покровом – тектумом – располагается хорошо развитый промежуточный слой – инфратектум, состоящий из удлиненных ячеек, ориентированных перпендикулярно поверхности. Такой тип ультраструктуры легко узнается на поперечных срезах (рис. 2); косые срезы ячеек цикадовых выглядят иначе и немного напоминают пчелиные соты (рис. 3, 4). У большинства видов тектум по сравнению с нижележащим инфратектумом довольно тонкий. Подстилающий слой очень

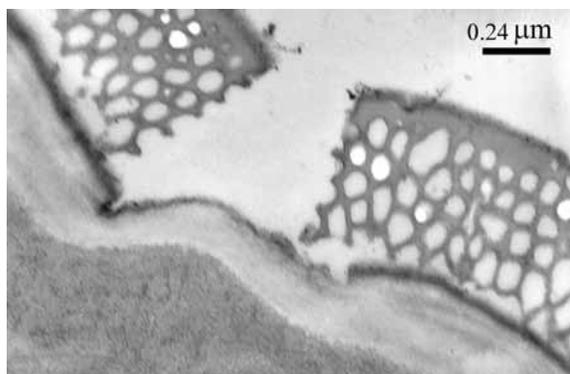


Рис. 3. *Ceratozamia mexicana*, косой срез экзины [8]

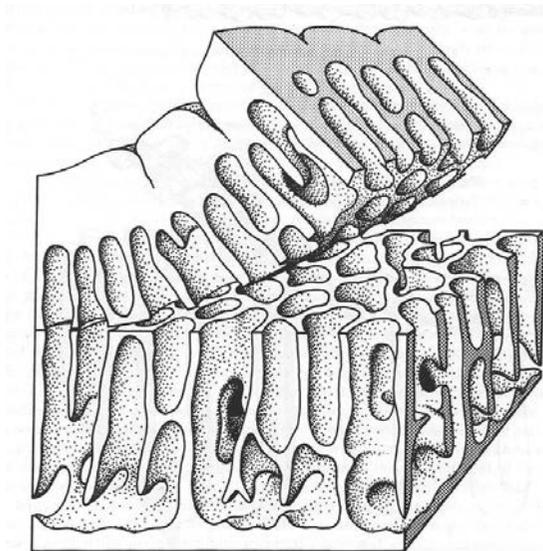
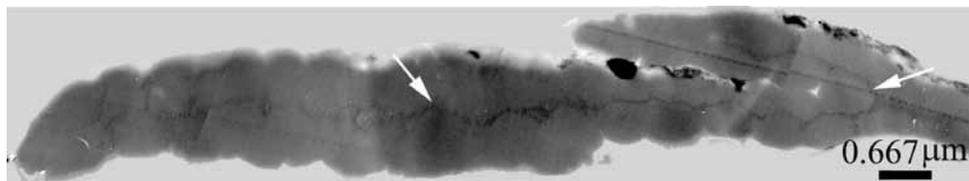


Рис. 4. Трехмерная реконструкция экзины цикадового *Zamia floridana*, показывающая удлиненно-ячеистую ультраструктуру. Экзина может выглядеть по-разному в зависимости от направления среза [9]

тонкий, плохо выраженный, может отсутствовать или быть неотличимым от нижележащего слоя. Тектум, инфратектум, подстилающий слой составляют эктэксину. Ковнутри от эктэксини располагается эндэксина, состоящая из одной или нескольких ламелл – протяженных, параллельных друг другу и поверхности пыльцевого зерна, плотно упакованных пластин. По направлению к апертуре эктэксина постепенно утончается, и в области апертуры инфратектум не выражен.

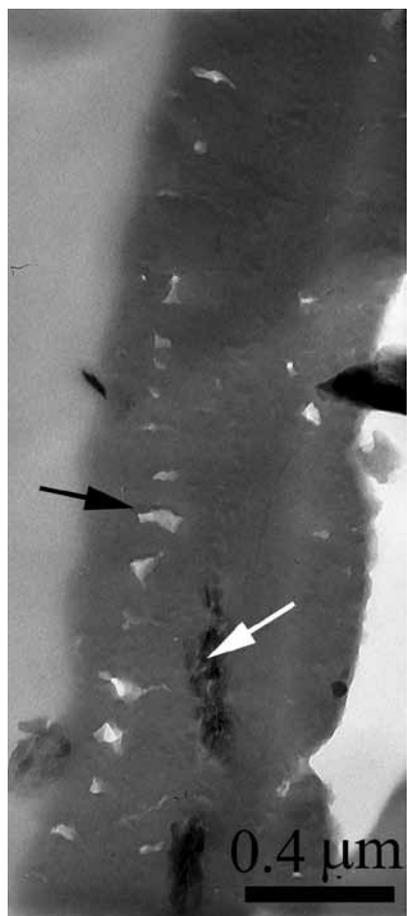
Имея в виду отличительные признаки ультраструктуры экзины современных цикадовых [4], мы приступили к изучению ископаемых. Пыльцевые зерна были извлечены из микроспорангиев цикадового *Cuscuta profusa* [8], найденного в юрских отложениях Грузии, и *Androstrobus prisma* из юрских отложений Англии [10].

Первая непредвиденная сложность, с которой мы столкнулись, – это невозможность найти апертуру. Апертура пыльцевого зерна любого современного цикадового занимает значительную часть оболочки. Эктэксина в апертурной области из-за



**Рис. 5.** *Androstrobus prisma*, участок практически гомогенной экзины, экзина многократно варьирует по толщине [10]

редукции инфратектума гораздо тоньше, чем во внеапертурных областях. На сериальных срезах центральной части пыльцевого зерна неизбежным образом должен присутствовать один и тот же протяженный утонченный участок. Тем не менее, мы его не обнаружили. Сериальные срезы показывали лишь многократные небольшой протяженности изменения толщины экзины (рис. 5): небольшое утончение на первом срезе сменялось утолщением в этой области на следующем срезе, утончением в другой области на третьем срезе и т.д. Такие вариации соответствуют скульптуре поверхности, но никак не апертуре.



**Рис. 6.** *Androstrobus prisma*, участок экзины с сохранившимися ячейками [9]

Поскольку мы изучали материал из спорангиев, пыльцевых зерен было много, но ни на одном из них апертура не была найдена. Приходится признать, что для изученных юрских цикадовых характерны безапертурные пыльцевые зерна.

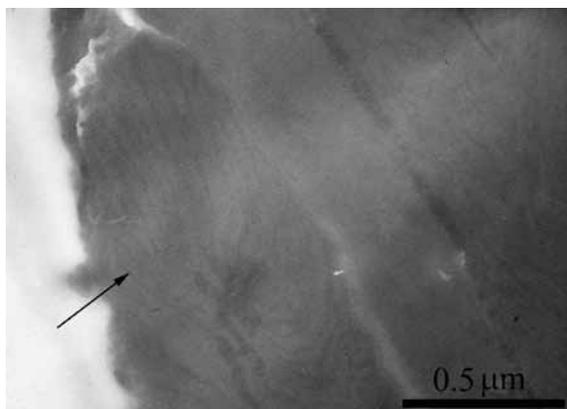
На снимках, сделанных под световым микроскопом, также не удастся различить обычно характерные для цикадовых гантелевидные очертания апертуры. Оболочки пыльцевых зерен при фоссилизации сминаются и уплощаются, апертура могла бы быть замаскирована одной из таких складок, но ТЭМ показывает, что апертура действительно отсутствует. Ранее [3] изучали с применением ТЭМ другие виды рода *Androstrobus* из меловых отложений Аргентины. Пыльцевые зерна были описаны как однобороздные. Тем не менее, вариации в толщине оболочек на приведенных иллюстрациях очень напоминают наблюдавшиеся нами. Мы предполагаем, что пыльцевые зерна были определены как однобороздные не потому, что была найдена борозда, а потому, что заранее было известно, что пыльцевые зерна цикадовых долж-

ны быть однобороздными. К сожалению, окончательных выводов по опубликованному материалу сделать нельзя: нужно проследивать изменения толщины во всей серии срезов, а для публикаций обычно выбирают один срез из серии.

Теперь нам известно, что для цикадовых характерны и безапертурные пыльцевые зерна, хотя до наших дней такой тип строения не дошел. Может быть, все ископаемые цикадовые в действительности имели безапертурные пыльцевые зерна? Нет, это не так. [5] изучил с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) пыльцевые зерна цикадовых из юрских отложений Англии, сохранившие трехмерную структуру. Эти несмятые пыльцевые зерна (очень редкий для ископаемых объектов случай, что придает материалу особую ценность) демонстрируют отчетливую борозду. Таким образом, в том, что касается апертуры, в прошлом цикадовые были более разнообразны, чем в настоящее время.

Вторая неожиданная проблема – это ультраструктура экзины изучаемых цикадовых. Мы предполагали либо обнаружить удлинненно-ячеистый тип ультраструктуры, характерный для современных цикадовых, либо более примитивную ультраструктуру, из которой он мог бы в ходе эволюции сформироваться. Срезы же показывали полностью гомогенную ультраструктуру (рис. 5), что вообще-то характерно для споровых растений, а никак не для семенных. Оказалось, что эта проблема связана с сохранностью материала. При рассмотрении многих серий срезов выяснилось, что местами, на некоторых участках удлинненные ячеи присутствуют, но следующие срезы этого же пыльцевого зерна опять оказывались полностью гомогенными (рис. 6, 7). Мы предполагаем, что удлинненно-ячеистая экзина цикадовых имеет невысокий потенциал сохранности. Под давлением перегородки ячеек «схлопываются», пространства между ними становятся неразличимыми, за исключением небольших редких участков, где оболочка претерпела меньшее воздействие.

Такое чередование гомогенных и ячеистых участков было обнаружено у обоих изученных нами объектов. Мы наблюдали его и на срезах, опубликованных [3,6] не приводят срезов, но в описании упоминают о плохой сохранности экзины изученных ими пыльцевых зерен цикадовых из триаса Антарктики. Плохая сохранность изучаемого материала – это постоянная опасность, подстерегающая палеонтолога и влияющая на достоверность выводов его исследований. Но в данном случае сохранность не просто не слишком хорошая, она специфическая, харак-



**Рис. 7.** *Cycas profusa*, участок экзины, ячеи – исчезающие, щелевидные, различимы лишь благодаря электронно-плотному содержанию (8)

терная именно для пыльцевых зерен цикадовых, отражающая особенности ультраструктуры экзины цикадовых. Такой тип сохранности, когда в пределах одного таксона, иногда и на разных участках срезов одного и того же пыльцевого зерна, наблюдается чередование гомогенных и ячеистых участков эктэзины, можно использовать в качестве признака, указывающего на принадлежность к цикадовым.

Какие выводы можно сделать по результатам изучения ископаемого материала и сравнения с данными по современным? В прошлом цикадовые были более разнообразны по типу апертуры пыльцевых зерен, а вот по ультраструктуре экзины выявлена преемственность между вымершими и ныне живущими представителями группы. Полученная информация может быть использована для выявления пыльцевых зерен цикадовых в комплексах дисперсных пыльцевых зерен и спор: если у «лодочковидных» пыльцевых зерен, обычно описываемых как однобороздные, под СЭМ и ТЭМ апертура не выявляется, а срезы показывают чередование гомогенной и ячеистой экзины – это может служить указанием на принадлежность к цикадовым.

## Литература

1. *Завьялова Н.Е.* 2004. Проблемы и перспективы электронно-микроскопических исследований в палеопалинологии. Бюллетень московского общества испытателей природы. Отд. Биол. – Т. 109. – Вып. 1. – С. 75–80.
2. *Теклева М.В.* 2013. Скрытое разнообразие, или электронный микроскоп спешит на помощь. Биология и медицинская наука. – М. Изд-во МОЛНЕТ. – 2013. – С. 158–167.
3. *Archangel'sky S., Villar de Seoane L.* 2004. Cycadean diversity in the Cretaceous of Patagonia, Argentina. Three new *Androstrobus* species from the Baquero Group. Review of Palaeobotany and Palynology 131, 1–28.
4. *Audran J.C., Masure E.* 1977. Contribution à la connaissance de la composition des sporodermes chez les Cycadales (Prépermaphytes). Étude en microscopie électronique à transmission (M.E.T.) et à balayage (M.E.B.). Palaeontographica 162, 115–158.
5. *Hill C.R.* 1990. Ultrastructure of in situ fossil cycad pollen from the English Jurassic, with a description of the male cone *Androstrobus balmei* sp. nov. Review of Palaeobotany and Palynology 65, 165–173.
6. *Klavins S.D., Taylor E.L., Krings M., Taylor T.N.* 2003. Gymnosperms from the Middle Triassic of Antarctica: the first structurally preserved cycad pollen cone. International Journal of Plant Sciences 164 (6), 1007–1020.
7. *Taylor T.N., Taylor E.L., Krings M.* – 2009. – Paleobotany: the biology and evolution of fossil plants. – 1230 pp.
8. *Tekleva M.V., Polevova S.V., Zavalova N.E.* 2007. On some peculiarities of sporoderm structure in members of the Cycadales and Ginkgoales. Palaeontological Journal 41, 1162–1178.
9. *Zavada M.* 1983. Pollen wall development of *Zamia floridana*. Pollen et Spores, 25: 287–304.
10. *Zavalova N., van Konijnenburg-van Cittert J.* 2012. Exine ultrastructure of in situ pollen from the cycadalean cone *Androstrobus prisma* Thomas et Harris 1960 from the Jurassic of England. Review of Palaeobotany and Palynology, 173: 15–22.

# Обыкновенная бурозубка и ее внутривидовые гибриды

А.В. Поляков, П.М. Бородин

*Поляков Андрей Викторович, кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник Института цитологии и генетики СО РАН.*

*Бородин Павел Михайлович, доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией Института цитологии и генетики СО РАН.*

*Проект РФФИ № 13-04-11512*

## В поисках изменчивости

Природа внутривидового разнообразия давно является предметом пристального изучения. Это не удивительно, ведь именно способность животных и растений к изменчивости считается основой эволюции. Постоянно накапливающиеся данные подтверждают неоднородность популяций, принадлежащих одному виду, особенно если этот вид имеет широкий географический ареал. Чем более удалены друг от друга популяции, тем заметнее различия между ними. Самое распространенное объяснение таких наблюдений – это адаптация популяций к неодинаковым условиям обитания. Выглядит это вполне убедительно: на севере холодно, на юге жарко, разные типы растительности, почвы, влажности и т.д. Вот с этими различиями и связывают появление адаптивных признаков, которые, накапливаясь, делают популяции все более непохожими друг на друга и, в конечном счете, могут привести к образованию новых видов. Однако эта статья посвящена другому источнику внутривидового разнообразия, который не связан с адаптивной изменчивостью, но, тем не менее, может играть значительную роль в микроэволюции.

Для начала необходимо заметить, что изучение изменчивости природ-

ных популяций – это довольно сложное занятие, прежде всего из-за дефицита подходящих маркеров. Исторически для этих целей использовались морфологические признаки, оценка которых носит в основном количественный характер и способна в большинстве случаев выявить разницу между популяциями. Обнаружить, но не изучить на качественном уровне. Много изменилось, когда исследователи научились распознавать отдельные хромосомы и участки внутри хромосом. С использованием этого подхода были обнаружены виды-близнецы у кузнечиков, ящериц, мышей, полевок, слепышей и др.

Чемпионом по степени изученности и информативности этого изучения стала обыкновенная бурозубка (*Sorex araneus*) – небольшой насекомоядный зверек, распространенный на большей части северной территории Евразии. Гаплоидный кариотип бурозубки подразделяется на две части: инвариантную и вариабельную. Инвариантная часть состоит из половых хромосом и четырех двуплечих аутосом, которые абсолютно одинаковы у всех хромосомных рас. Вариабельная часть кариотипа представлена десятью одноплечими аутоосомами, которые в процессе эволюции вида слились (а некоторые не слились) между собой в двуплечие хромосомы. У каждой группы популяций сформировался свой, характерный только для нее набор хромосом. В пределах территории вида каждый кариотип обладает своим собственным ареалом, который граничит с ареалом другого кариотипа. Группы популяций, характеризующиеся одним кариотипом, стали называть хромосомными расами. Сегодня, благодаря активности множества исследовательских коллективов, известно более семидесяти таких рас [3].

### Хромосомные расы в зоне контакта

Происхождение хромосомных рас бурозубки связывают со временем последнего ледникового периода, когда ареал вида был фрагментирован, и эволюция кариотипов проходила в изолированных друг от друга популяциях. После отступления ледников (около 12 тыс. лет назад) популяции бурозубки реколонизировали, ставшие доступными для существования территории и ареалы хромосомных рас сомкнулись. Для того чтобы выяснить, что происходит в области контакта между расами, мы отправились в те места, где по нашим предположениям должны смыкаться ареалы двух сибирских хромосомных рас бурозубки: томской и новосибирской (названия хромосомным расам бурозубки принято давать по крупным населенным пунктам, расположенным вблизи их первичного обнаружения).

Для удобства каждое хромосомное плечо землеройки обозначено буквой латинского алфавита и плечам вариабельной части кариотипа достались буквы *g, h, i, k, m, n, o, p, q, r*. Если две одноплечих хромосомы слиты в одну, их обозначают двумя буквами. Так вот у новосибирской и томской рас наборы хромосом записываются следующим образом: *go, hn, ik, mp, qr* для первой и *gk, hi, mn, o, p, q, r* для второй. Из этой записи видно, что комбинации плеч двуплечих хромосом у рас совершенно разные. Кроме того, если в новосибирской расе в слияниях участвуют все десять хромосом вариабельной части кариотипа, то в томской слияние коснулось только шести хромосом, тогда как оставшиеся четыре сохранились в исходной форме.

Что мы могли ожидать на территории, где зверьки двух рас существуют вместе? Поскольку это представители одного и того же вида, ничто не должно препятствовать скрещиваниям между ними и появлению на свет межрасовых гибридов. Какими должны быть эти гибриды, несложно представить чисто теоретически. Клетки не гибридных зверьков, так называемых «чистых рас», содержат по двойному набору хромосом своей расы, гибриды же получают от родителей по одинарному набору хромосом двух разных рас. Клетки гибридов между расами Новосибирск и Томск будут иметь такой набор: *go, gk, hn, hi, ik, mn, mp, qr, o, p, q, r*.

В процессе формирования гамет хромосомы проходят через процесс конъюгации – каждое плечо каждой хромосомы как бы склеивается с гомологичным плечом гомологичной хромосомы. У представителей чистых расы с этим проблем нет, у гибридов же так не получается – плечо *g* хромосомы *go* конъюгирует с гомологичным плечом хромосомы *gk*, а плечо *k* хромосомы *gk* – с гомологичным плечом хромосомы *ik* и так далее. В результате получаются две цепочки из девяти и трех хромосом: *o/og/gk/ki/ih/hn/nm/mp/p* и *q/qr/t* и их принято называть комплексами СІХ и СІІІ (С здесь сокращение английского *chain* – цепь, а римская цифра указывает количество хромосом в цепи) (*рис.1 цветной вкладки*).

Из предыдущих исследований известно, что такие комплексы как СІІІ обычно не являются сколько-нибудь тяжелым грузом для их носителей. В то же время формирование и менее сложных комплексов, чем СІХ, вызывает тяжелые последствия и проявляется в бесплодии у лабораторных линий домовых мышей. Получается, что у наших гибридов, буде они обнаружатся, есть все шансы оказаться бесплодными. Кроме того, опять же из предыдущих работ нам было известно, что бурозубки новосибирской и томской рас могут иметь различия по морфологическим признакам, а именно: зверьки томской расы могут оказаться крупнее [1]. На что будут похожи гибриды? Вооружившись всей этой информацией, мы начали поиск гибридов.

## Потомки гибридов – и гибриды и не гибриды

И гибриды нашлись. Анализируя цитогенетические препараты, мы выяснили, что распределение кариотипов соответствует закономерности, описанной на *рис. 1*.

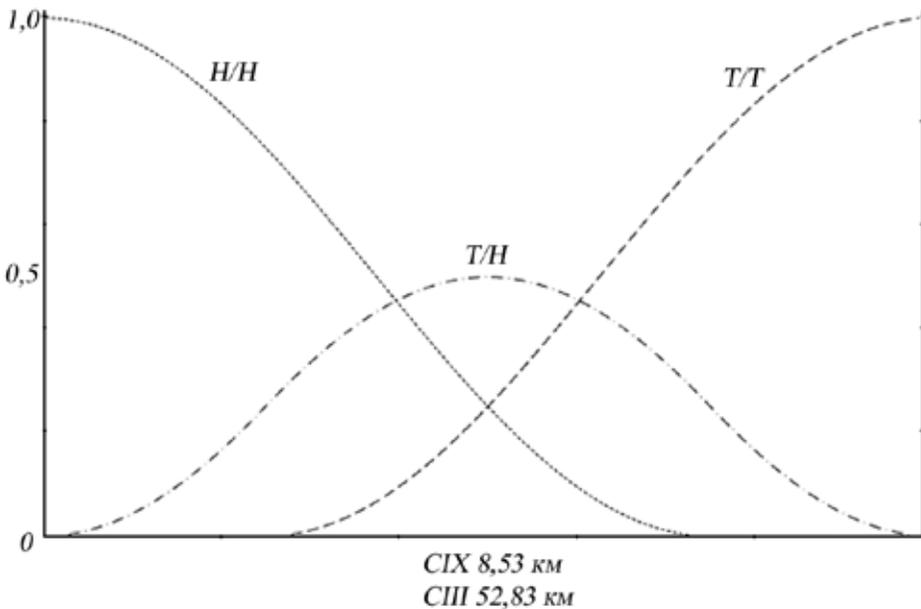
Гибридные бурозубки встречаются с разной частотой по всей зоне контакта двух рас, и значит, она является зоной гибридизации или гибридной зоной. Ширина гибридной зоны по комплексу СІХ оказалась равна 8,53 км. Просмотрев нескольких гибридных зверьков, мы не выявили серьезных нарушений их плодовитости.

Теперь необходимо рассмотреть еще одну интересную особенность: как в процессе гибридизации наследуются наборы хромосом. Вспомним, что половые клетки большинства видов животных и растений имеют гаплоидный (одинарный) набор хромосом, причем хромосомы обоих родителей намешаны в них случайным образом. У межрасового гибрида землеройки это не так: гаметы несут хромосомы только одной расы. В случае гибрида между новосибирской и томской расами половина его гамет несет хромосомы новосибир-

ской расы, а другая половина – томской. Когда этот гибрид начинает размножаться, он проявляет себя как представитель двух рас одновременно: передает от себя гаметы с несмешанными хромосомами и той и другой расы. Ну а что за потомство при этом получится, зависит уже от того, с кем этот гибрид вступит в связь. В таблице показано, какие кариотипы будут иметь потомки гибридов.

Из таблицы видно, что гибриды производят на свет как представителей обеих чистых рас, так и себе подобных гибридов, причем все потомки будут уже гибридами второго поколения. И сколько бы ни прошло времени с момента образования гибридной зоны, сколько бы скрещиваний ни миновало, населять ее будут только животные с кариотипами чистых рас и гибридов между ними. Однако со временем в процесс гибридного скрещивания будет вовлекаться все больше животных, и ширина гибридной зоны должна будет увеличиваться. Вот эта самая ширина и является одной из основных характеристик гибридной зоны.

### Ширина гибридной зоны – это ее возраст



**Рис. 1.** Распределение бурозубок новосибирской (Н/Н) и томской (Т/Т) хромосомных рас и гибридов между ними (Т/Н) в зоне гибридизации. Ордината – частота от 0 до 1; абсцисса – ширина гибридной зоны

Какие факторы могут влиять на ширину гибридной зоны? В первую очередь, это, конечно, подвижность ее обитателей: у животных это дальность расселения молодняка, покинувшего родные гнезда; у растений – расто-

ание, на которое семена распространяются с помощью ветра, насекомых и т.д. Представим, что в непосредственной близости от центра гибридной зоны оказались, каждое со своей стороны, два гнезда землероек двух рас. Допустим, что особенности ландшафта не влияют на направление расселения, в этом случае молодняк устремится с равной вероятностью в разные стороны и кто-то из них – на территорию чужой расы. Если дальность расселения составляет (гипотетически) 500 м, вот мы уже и получаем ширину гибридной зоны в километр. Те молодые зверьки, которые оказались на территории чужой расы, через год дадут свое потомство, которое так же будет расселяться во все направления и, в том числе, далее вглубь чужой расы.

Британские ученые Бартон и Гейл [2] предложили алгоритм расчета зависимости ширины гибридной зоны ( $w$ ) от длительности ее существования ( $t$ ) и дальности расселения составляющих ее особей ( $\sigma$ ). Возраст гибридной зоны ( $t$ ) измеряется здесь количеством генераций, но в природе большинство видов размножаются раз в год, поэтому при грубой оценке количество генераций соответствует количеству лет.

$$w = 2.51\sigma\sqrt{t}$$

На основании этой формулы приблизительный возраст нашей гибридной зоны, если принять подвижность бурозубок 500 м за поколение, составляет менее 50 лет:

$$t = [w/(2,51\sigma)]^2 = [8,53 / (2,51 \times 0,5)]^2 \sim 46,23$$

Интересный результат? Несомненно. Однако не все так просто, ведь в кариотипах томской и новосибирской рас есть еще один маркер – те самые хромосомы, которые формируют у гибридов комплекс СIII. Так вот ширина гибридной зоны по этому комплексу оказалась равной 52,83 км. С учетом этого параметра длительность гибридизации возрастает в 38 раз и достигает 1771,8 лет.

$$t = [w/(2,51\sigma)]^2 = [52,83 / (2,51 \times 0,5)]^2 \sim 1771,8$$

В чем причина такой разницы? Все дело в том, что формула Бартона и Гейла оценивает процессы, происходящие в таких гибридных зонах, где мутации, накопившиеся в расах, не влияют на успех гибридизации. Скорее всего, это относится к комплексу СIII и оценка с помощью этого комплекса возраста гибридной зоны более адекватна. Используя эту оценку, можно определить скорость, с которой расоспецифические признаки распространяются на ареале соседней расы. Для комплекса СIII эта скорость составляет 29,8 м/год. Другой же комплекс – СIХ – проявляет явное негативное влияние на гибридизацию – скорость расширения гибридной зоны настолько мала (4,8 м/год), что ею можно вообще пренебречь и считать эту зону стабильной.

Ну а что же с морфологией? Здесь тоже обнаружилось кое-что интересное. Ну, во-первых, мы убедились, что зверьки разных рас действительно различаются по размерам и подтвердили предположение Бориса Степановича Юдина о том, что бурозубки новосибирской расы достоверно мельче бурозубок томской расы. Кроме того, многомерный геометрический анализ морфологических признаков черепа и нижней челюсти бурозубок показал, что

и центр и ширина (от 6,8 до 36,0 км) гибридной зоны по этим признакам совпадают с хромосомной гибридной зоной.

О чем это говорит? Да о том, что вместе с хромосомными мутациями в популяциях бурозубок одновременно накапливались и генные мутации, которые проявились, в частности, и в морфологических различиях между бурозубками новосибирской и томской хромосомных рас.

### **Природа репродуктивного барьера**

Вот теперь, когда структура гибридной зоны оказалась более или менее определена, появилась возможность поговорить о механизмах, обеспечивающих ее существование. Тот механизм, который препятствует расширению зоны по комплексу С1Х, называется репродуктивным барьером. О природе репродуктивного барьера исследователи спорят до сих пор. Одни считают, что землеройки обладают способностью распознавать друг друга и избегают контактов с представителями другой расы. Однако в этом случае гибриды просто не появлялись бы в зоне контакта зверьков двух рас. Ну, или их было бы значительно меньше, чем следовало бы ожидать при нормальной гибридизации. В нашей же зоне их было именно столько, сколько и должно было быть, в случае если скрещиванию бурозубок разных рас ничто не препятствует.

Другая группа исследователей предпочитает гипотезу о цитогенетической природе репродуктивного барьера. Ведь действительно, при случайном, равновероятном расхождении хромосом в гаметы у гибридов должна быть такая путаница, что вероятность формирования нормальной плодовитости у этой группы животных стремилась бы к нулю. Тем не менее, бурозубки каким-то образом справляются с этой проблемой и, как уже было сказано выше, демонстрируют плодовитость, близкую к нормальной.

Существует еще одна гипотеза, которую, по-видимому, поддерживают наши данные: формирование репродуктивного барьера генными мутациями. Если сравнить комплексы хромосом, по которым мы определяли ширину гибридной зоны, то получится, что длина хромосом варибельной части кариотипа составляет 40,39 % от общей длины всех хромосом кариотипа. При этом длина хромосом комплекса С1Х – 34,61% а комплекса С1П – 5,78%. Комплекс С1П в шесть раз короче комплекса С1Х и, говоря очень приблизительно, вероятность появления и фиксации в нем мутаций на столько же меньше. По нашему мнению, мутации, зафиксировавшиеся в хромосомах длинного комплекса, и формируют репродуктивный барьер. Не исключено, конечно, что и длинная инвариантная часть кариотипа несет подобные мутации и для этих хромосом также существуют ограничения для распространения через гибридов, но на цитогенетическом уровне мы не в состоянии это зафиксировать.

Возможный механизм влияния мутаций на формирование репродуктивного барьера можно представить следующим образом. Находясь в кариотипе гибрида, хромосомы двух рас конъюгируют, их фрагменты рекомбинируют и часть генов одной расы попадает в кариотип другой и наоборот. В этом случае весьма вероятен такой эффект как абберрантное функционирование генов в окружении нового генетического фона. Стройная, сложившаяся эволюционным путем в течение многих столетий генная система претерпевает резкие

изменения и перестает работать нормально. В этом случае серьезные проблемы с плодовитостью и/или жизнеспособностью могут возникнуть не у самих гибридов первого поколения, а у их потомков. Вся трудность заключается в том, что с помощью цитогенетических методов мы не можем выявить этих гибридов второго поколения, для того, чтобы оценить их состояние или хотя бы частоту их встречаемости в гибридной зоне. Это становится понятным, если еще раз обратиться к таблице, из которой видно, что потомки гибридов по карiotипам не отличаются от самих гибридов и родительских рас.

### **Развитие гибридных зон**

В любом случае, какой бы механизм ни определял природу репродуктивного барьера, чем этот барьер мощнее, тем уже будет зона гибридизации. В таких условиях популяции остаются практически изолированными друг от друга и продолжают независимо накапливать мутации. Различия между популяциями будут постепенно увеличиваться и, при длительном течении процесса, они имеют возможность стать самостоятельными видами.

Что происходит, если межпопуляционные различия не спровоцируют формирование репродуктивного барьера, как в случае комплекса хромосом СПП? Мутации, появившиеся за время изоляции, передаются из одной расы в другую через гибридов, формируя зону полиморфизма, которая с течением времени будет беспрепятственно расширяться. Как мы оценили раньше, динамика этого расширения будет не высока, около 30 м/год, и для полевого исследователя зафиксировать ее практически невозможно. В этом случае попытки объяснить наблюдаемый полиморфизм иными причинами, чем зона вторичного контакта популяций, может вызвать появление ложных интерпретаций и искаженного представления об источниках внутривидовой изменчивости.

Понятно, что рано или поздно гибридная зона расширится до границ контактирующих популяций. В этом случае мы будем наблюдать равномерно распределенный по всей территории вида полиморфизм, дальнейшая судьба которого лежит вне рамок темы этой статьи.

### **Заключение**

Трудно сказать сегодня, насколько широко распространен в природе этот тип изменчивости, источником которого служат прежние катастрофы. Если учесть масштабы ледникового периода, можно с уверенностью утверждать, что все обитающие на нашей планете виды в той или иной степени подвергались его влиянию. В таком случае полиморфизм, распространяющийся из зон вторичного контакта дивергировавших популяций, может иметь значительный размах.

Если степень дивергенции популяций существенна настолько, что в зоне вторичного контакта между ними произошло формирование репродуктивного барьера, различия между этими популяциями будут продолжать накапливаться до тех пор, пока не достигнут видového уровня. Но до той поры, когда видообразование завершится, для исследователя эти популяции будут продолжать оставаться примером внутривидовой изменчивости, объяснить которую адекватно без знаний об ее истинной природе невозможно.

Работа поддержана грантами РФФИ № 13-04-00316-а и № 13-04-11512-д-с.

**Таблица.** Типы скрещиваний между гибридными (Т/Н) бурозубками между собой и представителями томской (Т/Т) и новосибирской (Н/Н) хромосомных рас

Кариотип		2N	Т/Т	Н/Н	Т/Н	
	Гаметы	1N	Т	Н	Т	Н
2N	1N	Потомки	2N			
Т/Н	Т		Т/Т	Т/Н	Т/Т	Т/Н
	Н		Т/Н	Н/Н	Т/Н	Н/Н

### Словарь терминов

Аутосомы	все хромосомы у раздельнополых организмов, кроме половых;
Виды-близнецы	виды, не имеющие различий по большинству морфологических признаков, но репродуктивно изолированные;
Гаметы	репродуктивные клетки, имеющие гаплоидный (одинарный) набор хромосом;
Генерация	поколение, группа организмов в популяции, одинаково отдаленных в родственном отношении от общих предков;
Дивергенция	расхождение признаков организмов в ходе эволюции;
Кариотип	совокупность признаков хромосом (их число, размеры, форма и детали микроскопического строения) в клетках тела организма определенного вида;
Микроэволюция	распространение в популяции малых изменений на протяжении нескольких поколений; эволюционные изменения на внутривидовом уровне;
Мутация	стойкое (то есть, такое, которое может быть унаследовано потомками данной клетки или организма) преобразование генотипа, происходящее под влиянием внешней или внутренней среды;
Популяция	совокупность организмов одного вида, длительное время обитающих на одной территории;

Рекомбинация	перераспределение генетического материала родителей в потомстве, приводящее к наследственной комбинативной изменчивости; рекомбинация обусловлена обменом отдельных сегментов (участков) хромосом;
Хромосома	нуклеопротеидная структура в ядре клетки, предназначенная для хранения, реализации и передачи наследственной информации;
Цитогенетический препарат	препарат для микроскопического изучения кариотипа.

## Литература

1. Юдин Б.С. Насекомоядные животные Сибири. Наука, Новосибирск. 1989.
2. Barton N.H., Gale K.S. Genetic analysis of hybrid zones. In: Hybrid Zones and the Evolutionary Process (R. G. Harrison, ed). – Oxford University Press, New York. – 1993. – PP. 13–45.
3. Wójcik J.M., Borodin P.M., Fedyk S., Fredga K., Hausser J., Mishta A., Orlov V.N., Searle J.B., Volobouev V.T. & Zima J. The list of the chromosome races of the common shrew *Sorex araneus* – 2003. – updated 2002): the International *Sorex araneus* Cytogenetics Committee (ISACC). *Mammalia* 67:169–178.

# Как растянуть железобетон?

Л.В. Козлова

*Козлова Людмила Валерьевна, кандидат биологических наук, младший научный сотрудник лаборатории механизмов роста растительных клеток Казанского института биохимии и биофизики РАН. Проект РФФИ № 13-04-11513*

**Р**ост — это необратимое увеличение объема и/или массы живого организма, сопровождаемое новообразованием элементов его структуры (клеток, тканей, органов). Принципиальное отличие процесса роста у животных и растений состоит в том, что увеличение размеров животного организма достигается в основном за счет клеточных делений, а растительного — по большей части за счет увеличения объемов существующих клеток. Именно этой своей особенностью растения обязаны тем рекордам, которые числятся на их царстве: самый большой живой организм на Земле секвойя-дендрон «Генерал Шерман». Дерево имеет массу 1910 тонн. Для сравнения: масса самого большого животного (синего кита) составляет около 190 тонн. Самым длинным организмом на Земле может считаться ротанговая пальма из семейства лиановидных, длина ее стебля может достигать 300 м. Самым быстрорастущим можно считать японский бамбук мадаке, который за сутки может вырасти больше, чем на 100 см.

Эти достижения тем более удивительны, если знать, что клетки растений окружены жестким образованием, построенным на основе полисахаридов — клеточной стенкой. Именно кле-

точные стенки растений были одним из первых объектов, попавшим под микроскоп (Роберт Гук на счастье научной общественности заинтересовался вопросом, отчего пробковое дерево так хорошо плавает, на тонких срезах дуба он обнаружил небольшие ячейки, заполненные воздухом, и назвал их клетками).

Клеточные стенки молодых клеток состоят из трех основных типов полисахаридов: целлюлозы, гемицеллюлоз и пектинов, а также содержат небольшие количества белка и фенольных соединений (состав клеточных стенок несколько отличается у однодольных и двудольных) (*таблица 1*). Целлюлоза представляет собой неразветвленную цепь из остатков глюкозы, связанных друг с другом одинаковыми гликозидными связями. Отсутствие заместителей (боковых цепочек иначе называемых разветвлениями) и однообразие соединения мономеров в цепи придает целлюлозе крайне жесткую конформацию. Ее пространственная структура настолько постоянна, что несколько дюжин единичных цепей целлюлозы могут соединяться друг с другом с образованием кристаллических структур (микрофибрилл). В различных растениях степень кристалличности целлюлозы различается, однако независимо от этого прочность микрофибрилл сопоставима с прочностью стали. Именно прочность микрофибрилл дает молодым растениям, еще не имеющим волокон (клеток механической ткани, играющих роль скелета у более взрослых растений), преодолевать силу гравитации и тянуться к солнцу.

**Таблица 1.** Состав клеточных стенок молодых клеток двудольных растений и злаковых однодольных (тип I) и злаков (тип II) [1].

Компоненты клеточных стенок	Содержание, % от массы клеточных стенок	
	I тип	II тип
Целлюлоза	30	30
Ксилоглюкан*	25	4
Глюкуроноарабиноксилан*	5	30
Глюкан со смешанным типом связей	0	30
Пектины	35	5
Белки	5	1

□ гемицеллюлозы, \* – в названиях полисахаридов моносахар, из которого построен остов, как правило, стоит в конце, перед ним ставят названия моносахаридов, входящих в состав боковых цепочек

Гемицеллюлозы (*от греческого *hemi* – почти*) были названы так из-за определенного сходства с целлюлозой. Действительно: и тип гликозидной связи, и конформация единичных моносахаридных остатков, входящих в состав остова полисахаридов, составляющих этот класс веществ, у них та же самая, что и у целлюлозы. Различия заключаются либо в том, что к остову полисахарида присоединены боковые цепочки, составленные из других моносахаридов, либо тип гликозидной связи по длине остова все же непостоянен и иногда чередуется. Эти отличия приводят к тому, что гемицеллюлозы оказываются куда более гибкими молекулами, чем целлюлоза. При этом сходство строения их остовов дает им возможность к взаимодействию друг с другом (примерно так же, как взаимодействуют цепочки целлюлозы при образовании микрофибрилл, однако значительно слабее из-за нерегулярности строения гемицеллюлоз). Если отделить друг от друга молекулы целлюлозы, находящиеся в одной микрофибрилле, практически невозможно без их разрушения, то разъединить комплекс из гемицеллюлозы и целлюлозы довольно просто (это можно сделать с использованием сильных щелочей), чем с успехом пользуются в целлюлозно-бумажной и текстильной промышленности для получения чистой целлюлозы.

Однако в условиях *in vivo* (то есть, в живой клетке) такие агрессивные химические агенты не встречаются, и сеть, построенная на основе микрофибрилл целлюлозы и гемицеллюлоз (иначе называемых связующими гликанами), с успехом выполняет функцию несущей конструкции, на которую опирается клеточная стенка, а вместе с ней и вся клетка. Увидеть эту сеть можно в электронный микроскоп, если рассматривать клеточные стенки, из которых удалили пектин [2].

Последний класс полисахаридов, широко представленный в клеточных стенках, пектиновые вещества, отличаются от вышеописанных углеводов прежде всего тем, что в их состав обязательно входит галактуроновая кислота. Это тоже моносахарид, содержащий, однако, карбоксильную группу, что придает пектинам и вместе с ними всей клеточной стенке отрицательный заряд, тогда как остальные полисахариды почти полностью нейтральны. Молекулы галактуроновой кислоты, входящие в состав пектинов, как и молекулы любой другой слабой кислоты, способны взаимодействовать с ионами кальция, которых в клеточной стенке очень много. В результате возникновения ионных и координационных связей пектиновые вещества образуют прочные гели, что отражено в их названии (греч. пектос — свернувшийся, замерзший), а в повседневной жизни можно наблюдать при железировании джемов или мармелада из различных фруктов.

Принято считать, что в клеточной стенке описанные полисахариды пребывают именно в этом состоянии: твердые микрофибриллы, соединенные друг с другом гибкими гемицеллюлозными цепями, формирующие тем самым несущую конструкцию, которая уложена в гель или матрикс из пектиновых веществ

В качестве аналогии можно привести железобетон, в котором элементы арматуры (зачастую выполненные в виде сетки) обеспечивают необходимую прочность, а бетон – совместную работу армирующих элементов и их защиту от повреждений.

Явный минус приведенной метафоры заключается в том, что попытка хотя бы незначительно растянуть железобетонную конструкцию, не нарушив ее целостность, обречена на провал. В то время как клетки растений могут увеличивать свой объем до 30000 раз [4], что соответствует растяжению клеточной стенки примерно в 3000 раз. Осуществить растяжение композиционного материала (которым в первом приближении все же можно считать и клеточную стенку) возможно только при а) такой модификации сети армирующих элементов, которая позволит сохранить прочность материала, но не будет препятствовать увеличению его площади; б) определенных свойствах матрицы («бетона»), которая должна позволить передвигаться деталям «арматуры» друг относительно друга, при этом не разрушаясь сама.

Если говорить о «матрице», то в клеточных стенках I типа она, по всей видимости, представлена в первую очередь пектиновыми веществами. Клеточные стенки злаков бедны пектинами, и основным претендентом на роль геля, в который упакована несущая конструкция, является глюкан со смешанным типом связей. Как и пектиновые вещества, глюкан со смешанным типом связей известен своей способностью к образованию гелей (вспомните хотя бы студенистую овсяную кашу). Долгое время было принято считать этот полисахарид характерным исключительно для клеточных стенок растущих клеток, предполагалось, что он синтезируется в ходе роста растяжением, после чего претерпевает стремительный гидролиз. Однако в ходе работы над проектом нам удалось обнаружить глюкан со смешанным типом связей в клетках корней и coleoptилей кукурузы, уже закончивших рост [5]. Постепенно стали появляться и другие сообщения относительно высокого содержания этого полисахарида в зрелых тканях травянистых растений [6].

Структура полисахарида была исследована после того, как он был получен из растительного материала в результате работы фермента, специфически гидролизующего этот полимер. Оказалось, что в растягивающихся и не растягивающихся клетках проростков кукурузы глюкан со смешанным типом связей имеет разную структуру [5,7]. Полисахарид, находящийся в клеточных стенках растягивающихся клеток, способен к образованию более прочного геля, менее склонного к повреждениям. Иными словами, «матрикс» композитного материала, именуемого клеточной стенкой, в растягивающихся клетках проростков кукурузы значительно более устойчив к деформациям, чем в не растягивающихся. Как уже было упомянуто, это свойство матрицы необходимо для поддержания целостности материала, претерпевающего растяжение.

В ходе работы было обнаружено, что глюкан со смешанным типом связей может быть полностью извлечен из клеточных стенок в результате работы фермента, который специфически гидролизует этот полисахарид [7]. Как правило, такое поведение компонентов клеточной стенки связывают с тем, что эти молекулы располагаются между микрофибриллами целлюлозы, не взаимодействуя с ними [8]. Этот факт так же хорошо соотносится с идеей о том, что именно глюкан со смешанным типом связей служит в кле-

точных стенках II типа аналогом пектинового геля, а изменения его структуры в определенной степени регулируют подвижность микрофибрилл и гемицеллюлоз.

Однако каким образом в клеточных стенках растений может перестраиваться протяженная сеть из микрофибрилл и гемицеллюлоз? Здесь уместно ненадолго остановиться и изложить теорию профессора S. Thompson [9], согласно которой основной функцией гемицеллюлоз в растительной клеточной стенке является не только и не столько связывание микрофибрилл целлюлозы между собой, а, напротив, их разобщение. Предотвращение соединения микрофибрилл друг с другом необходимо для поддержания растяжимости клеточной стенки, ведь, как мы помним, растягивать материал, состоящий из взаимодействующих молекул целлюлозы – все равно, что растягивать стальной прут.

Помимо глюкана со смешанным типом связей, команду гемицеллюлоз в клеточных стенках II типа представляет глюкуроноарабиноксилан. Из названия этого полисахарида можно заключить, что его остов состоит из остатков ксилозы, к которой «по бокам» могут быть присоединены арабиноза и/или глюкуроновая кислота. Мы обнаружили высокую степень соответствия между количеством глюкуроноарабиноксилана, находящегося между микрофибриллами целлюлозы и не взаимодействующего с ними со стадиями процесса растяжения [10]. Инициация роста растяжением в корне кукурузы сопряжена с резким увеличением этой доли полисахарида в клеточных стенках, завершение роста растяжением, сопровождается снижением количества глюкуроноарабиноксилана, расталкивающего микрофибриллы, как в корнях, так и в колеоптилях проростков кукурузы [7]. Так же было показано, что в ходе роста растяжением снижается не только количество, но и молекулярная масса фрагментов глюкуроноарабиноксилана, находящихся между микрофибриллами [10]. Создается впечатление, что эти изменения могут сказываться на расстоянии между микрофибриллами целлюлозы, тем самым регулируя степень их «свободы». Противоположная тенденция была отмечена для фрагментов глюкуроноарабиноксилана, которые взаимодействуют с микрофибриллами: завершение роста растяжением сопровождалось повышением содержания полисахарида в составе этой фракции, как в корнях, так и в колеоптилях кукурузы [7]. В ходе исследования было выяснено, что фрагменты глюкуроноарабиноксилана, находящиеся между микрофибриллами и взаимодействующие с ними, находятся в составе одной молекулы, хотя и различаются по строению. Их ориентация в клеточных стенках кукурузы была подтверждена с применением иммуноцитохимического подхода.

Методы иммунохимии основаны на том, что антитела, выработанные в организме животного-реципиента против определенного вещества (антигена), будут «узнавать» его не только в организме хозяина, но и в окружающей среде, например, на срезах живых тканей. Имея в распоряжении антитела, специфичные к фрагментам глюкуроноарабиноксилана, не взаимодействующего с микрофибриллами, и глюкуроноарабиноксилана, взаимодействующего с ними, оказалось возможным установить, что первый действительно свободно располагается в матриксе клеточных стенок (не маскируется глюканом со смешанным типом связей), а второй открывает-

ся только после удаления гидролиза глюкана со смешанным типом связей (Агеева, неопубликованные данные). В этом проявляется очередное сходство глюкана со смешанным типом связей и пектинов, так как хорошо известно, что многие гемицеллюлозы, взаимодействующие с микрофибриллами, становятся доступны для антител только после депектинизации клеточных стенок [11].

Таким образом, в процессе нами было обнаружено, что ряд свойств полисахаридов, входящих в состав клеточных стенок II типа существенно изменяется в ходе роста растяжением. Эти изменения находятся в определенном соответствии с требованиями, предъявляемыми к любому композиционному материалу при его растяжении. Кроме того, полученные данные позволяют нам представить новую модель архитектуры клеточных стенок II типа, значительно более универсальную, чем ее предшественники. Предположительная архитектура клеточных стенок II типа представлена на *рис.1 цветной вкладки*.

## Литература

1. Горшкова Т.А. Растительная клеточная стенка как динамичная система – 2007. – Наука.:Москва. – 429 с.
2. Fujino T., Sone Y., Mitsuishi Y., Itoh T. Characterization of cross-links between cellulose microfibrils, and their occurrence during elongation growth in pea epicotyls // *Plant & Cell Physiology* – 2000 – V. 41. – P. 486–494.
3. Carpita N.C., Gibeaut D.M. Structural models of primary cell walls in flowering plants: consistency of molecular structure with the physical properties of the walls during growth // *Plant Journal* – 1993. – V. 3. – P. 1–30.
4. Cosgrove D.J. Growth of the plant cell wall // *Nature Reviews Molecular Cell Biology* – 2005. – V. 6 – P. 850–861.
5. Козлова Л.В., Снегирева А.В., Горшкова Т.А. Структура и распределение глюкана со смешанным типом связей на разных стадиях растяжения клеток корня кукурузы // *Физиология растений*. – 2012. – Т. 59. – С. 376–385.
6. Vega-Sanches M.E., Verhertbruggen Y., Scheller H.V., Ronald P.C. Abundance of mixed linkage glucan in mature tissues and secondary cell walls of grasses // *Plant Signal Behavior*. – 2013. – V. – <http://dx.doi.org/10.4161/psb.23143>.
7. Козлова Л.В. Глюкан со смешанным типом связей и глюкуроноарабиноксилан в ходе роста корней и coleoptилей кукурузы (*Zea mays* L.) // Автореф. ст. к.б.н. – 2012 – Печатный двор.:Казань – 25 с.
8. Pauly M., Albersheim P., Darvill A., York W.S. Molecular domains of the cellulose/xyloglucan network in the cell walls of higher plants // *Plant Journal* – 1999. – V. 20 – P. 629–639.
9. Thompson S.D. How do cell walls regulate plant growth? // *Journal of Experimental Botany*. – 2005. – V. 56. – P. 2275–2285.
10. Козлова Л.В., Микшина П.В., Горшкова Т.А. Глюкуроноарабиноксилан, извлекаемый при обработке эндоксилаナーзой, в различных зонах растущего корня проростков кукурузы // *Биохимия*. – 2012б. – Т. 77. – С. 503–513.
11. Marcus S.E., Verhertbruggen Y., Hervé C., Ordaz-Ortiz J.J., Farkas V., Pedersen H.L., Willats W.G., Knox J.P. Pectic homogalacturonan masks abundant

sets of xyloglucan epitopes in plant cell walls // BMC Plant Biology – 2008 – doi: 10.1186/1471-2229-8-60.

12. *Herve C., Rogowski A., Gilbert H.J., Knox J.P.* Enzymatic treatments reveal differential capacities for xylan recognition and degradation in primary and secondary plant cell walls // Plant Journal – 2009. – V. 58. – P. 413–422.

# О талантах к регенерации, червях, умеющих считать и судьбоносных генах

М.А. Кулакова

*Кулакова Милана Анатольевна,  
кандидат биологических наук,  
старший научный сотрудник  
кафедры эмбриологии СПбГУ  
Проект РФФИ № 13-04-11514*

Меня давно удивляло, почему в сказках нет позитивных героев, которые умели бы отращивать утраченные конечности или голову. Исключения из этого правила попадаются (см. вятскую сказку «Безручка»), но они на удивление редки. С обывательской точки зрения регенерация частей тела – удел существ если не монструозных, то очень далеких от облика человеческого, и даже фантастические допущения народной сказки с трудом преодолевают барьер между «нами» и «ними». А что же произойдет, если посмотреть на регенерационные процессы с точки зрения эволюционной биологии? Может быть, высшие животные не могут восстанавливать утраченные части тела в силу сложной организации? Как ни странно, сразу же обнаружится, что позвоночные далеко не самые «обиженные» существа по части регенерационных талантов. Хуже всего с регенерацией обстоят дела у нематод и коловраток. Это животные, у которых во взрослом состоянии клетки перестают делиться. Плохо с регенерацией у морских ежей и пиявок. Не умеют регенерировать взрослые насекомые – те, у которых уже прекратились возрастные линьки. Если посмотреть на самых успешных в

плане регенерации животных, окажется, что это губки, кишечноролостные, плоские черви, полихеты, морские звезды и... амфибии. Словом, если выставить оценки за способность к регенерации, далеко не все «двоечники» окажутся наверху эволюционного древа и не все «отличники» внизу. Правда, исключительные регенерационные способности все же остаются за животными низшими – губками и кишечноролостными. Билатеральные животные – те, у которых есть только одна ось симметрии, разделяющая их на две зеркальные половинки, распределили между собой эту способность самым произвольным образом. К примеру, некоторые полихеты могут отрастить утраченную голову и хвостовой конец таким образом, что из маленького фрагмента тела вырастает целый червь, а пиявки (тоже кольчатые черви) не способны к регенерации ни отдельных сегментов, ни внутренних органов. Если посмотреть на позвоночных животных, окажется, что картина и вовсе загадочна. Тритон и аксолотль – довольно сходные хвостатые амфибии с прекрасными регенерационными способностями, но первый умеет восстанавливать хрусталик глаза из клеток радужной оболочки, а второй – нет. Шпорцевая лягушка *Xenopus* регенерирует утраченные конечности, но только на стадии головастика. После метаморфоза вместо полноценной ноги у нее вырастает малофункциональный отросток, похожий на конический шип. Млекопитающие, как известно, регенерируют не лучшим образом, хотя и они могут восстанавливать самые кончики пальцев – дистальные части последних фаланг. Кроме того, некоторые из них (а именно – кролики и лабораторные мыши специальных генетических линий) умеют бесследно зарачивать дырки в ушных раковинах.

Похоже, что общий предок всех билатеральных животных неплохо регенерировал, но его многочисленные и разнообразные потомки теряли в ходе эволюции эту способность случайным образом. Что же отличает животных, способных к регенерации, от тех, кто к ней не способен? И почему некоторые группы животных (например, птицы и млекопитающие) в значительной степени «отказались» от такого замечательного умения?

Как мы уже знаем, животные, совершенно не способные к регенерации, состоят из фиксированного числа клеток. Эти клетки возникли путем деления предшественников во время эмбриогенеза, но все они терминально дифференцировались, то есть, приобрели узкую специализацию, и обратной дороги к недифференцированному состоянию, позволяющему запустить механизмы клеточного цикла и начать делиться, у таких клеток нет. Нет и регенерации. Те животные, которые умеют восстанавливать утраченные части тела, делают это при помощи специальных клеток, способных к делению. Эти клетки называются стволовыми. Популяция стволовых клеток в организме самообновляется. Каждая клетка при делении производит себе подобную и клетку, вступающую на путь дифференцировки. Таковы, например, замечательные неопласты плоских червей. Недавно выяснилось, что единственный неопласт способен «вылечить» планарию, получившую смертельную дозу ионизирующего облучения [1]. Это означает, что потомки неопластов могут превращаться в клетки любого типа, необходимо для жизни, регенерации и размножения. Такие универсальные

стволовые клетки называют тотипотентными. У большинства животных свойством тотипотентности обладает только оплодотворенная яйцеклетка и бластомеры (часто не все, а некоторые) на ранних сроках дробления. Стволовые клетки с узкой специализацией (способные давать клетки только одного типа) называют унипотентными. Клетки-сателлиты у позвоночных животных – из этой компании. Они умеют восстанавливать только мышцы. Интересно, что судьбу унипотентных клеток можно изменить, если обработать их специальными сигнальными белками [2].

И все же для полноценной регенерации одной способности производить делющиеся клетки недостаточно. Кроме «строительного» материала, у организма должен быть «проект», по которому можно отстроить разрушенную часть тела. Иными словами, животное должно «вспомнить», как сделать ногу, хвост, глаз или даже голову. Что представляют собой эти «воспоминания»? Догадаться не трудно – это эмбриональные программы или программы развития. В недифференцированных клетках будущего органа включаются эмбриональные гены. Они не просто направляют специализацию клеток в нужное русло, а координируют этот процесс во времени и пространстве таким образом, чтобы сформировался новый орган. Иногда программы дают сбой или не могут «запуститься» целиком. Тогда новая структура не вполне похожа на прежнюю. У речного рака вместо утраченного глаза может вырасти антенна, а новый хвост ящерицы содержит хрящевой стержень вместо позвонков. Шип вместо утраченной ноги у взрослой лягушки или рубец на коже млекопитающего – тоже результаты атипичной регенерации.

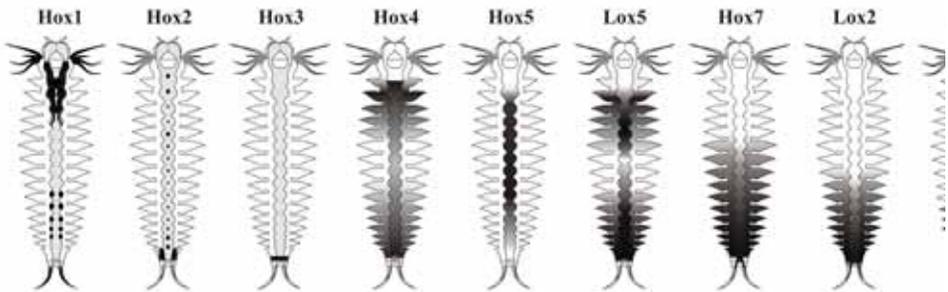
Интересно, что в первую неделю жизни новорожденные мыши умеют восстанавливать повреждения в сердечной мышце за счет деления клеток-кардиомиоцитов [3]. К сожалению, эта способность быстро и навсегда угасает. У взрослых млекопитающих сердце регенерирует атипично: в месте повреждения образуется фиброзная ткань. В целом, давно подмечено: чем моложе животное, тем благополучней оно регенерирует. И теперь понятно почему: проще всего активировать эмбриональные программы тому, кто их и не выключал.

Важнейшие участники эмбриональных программ – регуляторные гены. Они кодируют особые белки – транскрипционные факторы. Транскрипционные факторы определяют, какой набор генов в клетке будет работать, а какой – молчать. От этого зависят клеточные судьбы, а вместе с ними и судьбы самих организмов. Регуляторные гены, управляющие морфогенезами (от греч. *Morphê* – форма, и *genesis* – происхождение, или буквально «формообразование») в большинстве своем очень древние. Многие из них появились на заре становления многоклеточных животных. Но есть и такие гены, происхождение которых ассоциируют с эволюцией отдельных групп. В частности, билатеральные животные своим возникновением, а еще в большей степени разнообразием, обязаны Нох (читается по-русски как «Хокс»)-генам. Эти гены образуют кластеры, то есть, собраны в молекуле ДНК друг за другом так, словно стоят в очереди. Самое замечательное, что порядок их активации в организме тоже очередный. Эмбрион любого билатерального животного оказывается в определенный момент времени «по-

лосатым», как носок – это молекулярная радуга из Нох-белков делит тело эмбриона на отдельные территории. И хотя клетки в пределах этих участков еще не приступили к дифференцировке и формированию отдельных органов, да и сами участки пока еще мало отличимы друг от друга, решающее событие в жизни эмбриона состоялось – он регионализовался. Та морфологическая разница, которую мы наблюдаем между частями тела вдоль переднезадней оси, и есть результат работы кластера Нох-генов. Если бы вдруг эти гены перестали работать или все разом повсеместно включились, – эмбрион (а затем и взрослый организм) состоял бы из одинаковых элементов.

Попробуем разобраться, как работают эти важные гены у животных с разными способностями к регенерации. Для начала поговорим о полихетах – морских кольчатых червях. Они хорошо регенерируют, мы о них довольно много узнали, а главное, есть, с кем их сравнить. Родственные полихетам пиявки регенерируют очень плохо, а хвостатые амфибии, хоть и не состоят в близком родстве с полихетами, отлично восстанавливают утраченные части тела. Может быть, причину различий удастся понять, если сравнить работу древних регуляторных генов у этих животных?

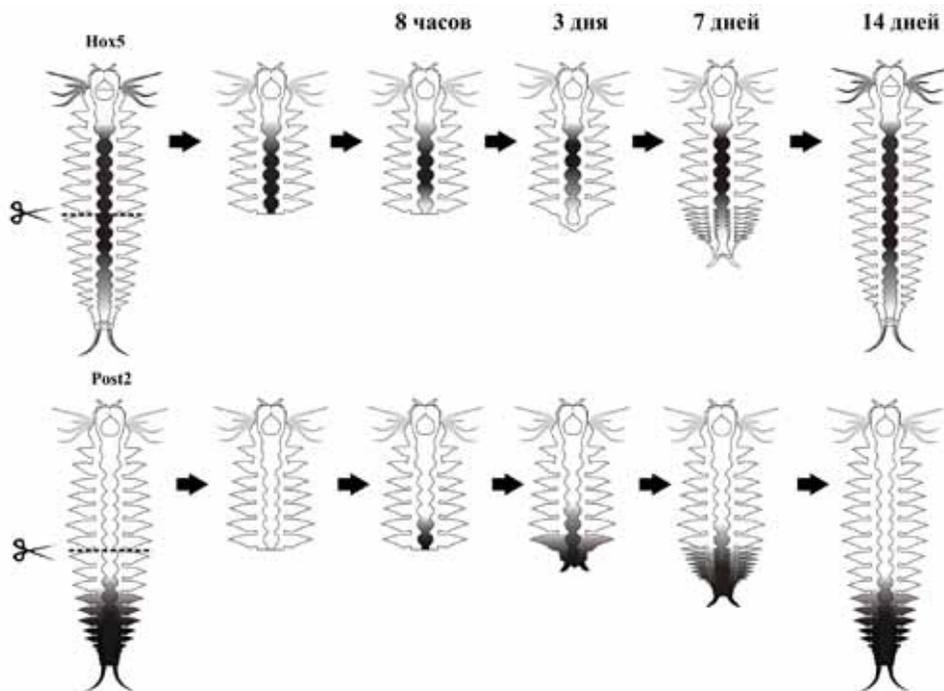
Итак, наша полихета – nereida *Alitta virens*. Она состоит из множества сегментов, похожих друг на друга. Сегменты появляются из зоны роста – особой области на заднем конце червя. Клетки зоны роста время от времени синхронно делятся, и из клеток-потомков формируется новый сегмент тела. Особенность этой полихеты в том, что она растет почти всю жизнь, и всю жизнь работают ее Нох-гены. Вполне логично допустить, что все они функционируют в сегментах червя сходным образом – ведь сегменты одинаковые. Оказалось, что это не так [4]. Каждый из Нох-генов обладает собственным рисунком транскрипции (*рис. 1*).



**Рис. 1** Области транскрипции девяти Нох-генов полихеты *Alitta virens*

Чем же они заняты? Если предположить, что Нох-гены все равно выполняют свои древние функции по установлению различий между сегментами, придется эти различия поискать. Может быть, сегменты отличаются степенью зрелости? К примеру, в молодых сегментах используется один набор Нох-белков, а в старых – другой? Оказалось, что по мере роста червя «растет» и число сегментов, в которых работает тот или иной Нох-ген. Рисунок

транскрипции меняется пропорционально длине тела. Значит, дело в чем-то другом. Единственное, что действительно отличает один сегмент полихеты от соседнего – это позиция относительно концов тела. Может быть, древние эмбриональные гены нужны растущей полихете для присвоения и поддержания позиционных значений каждому из многочисленных сегментов? Полихета «нумерует» сегменты при помощи набора Нох-белков, чтобы контролировать их рост и число? Если это действительно так, позиционный сбой (его легко устроить, если разрезать червя пополам) непременно должен сказаться на работе Нох-генов.



**Рис. 1** Транскрипционная динамика генов *Hox5* и *Post2* при регенерации полихеты. Задолго до первых морфологических признаков регенерации рисунок транскрипции обоих генов становится похож на исходный

Именно это и происходит [5]. В половинке червя быстро перестраивается транскрипция всего комплекса Нох-генов (*рис. 2*). Те сегменты, которые когда-то находились в середине тела, включают набор Нох-генов, который работает в «хвосте» и выключают «туловищные» гены. Как только реорганизация транскрипции произойдет, в организме начинаются восстановительные работы: делятся стволовые клетки, закладывается новая зона роста и самый кончик тела – пигидий.

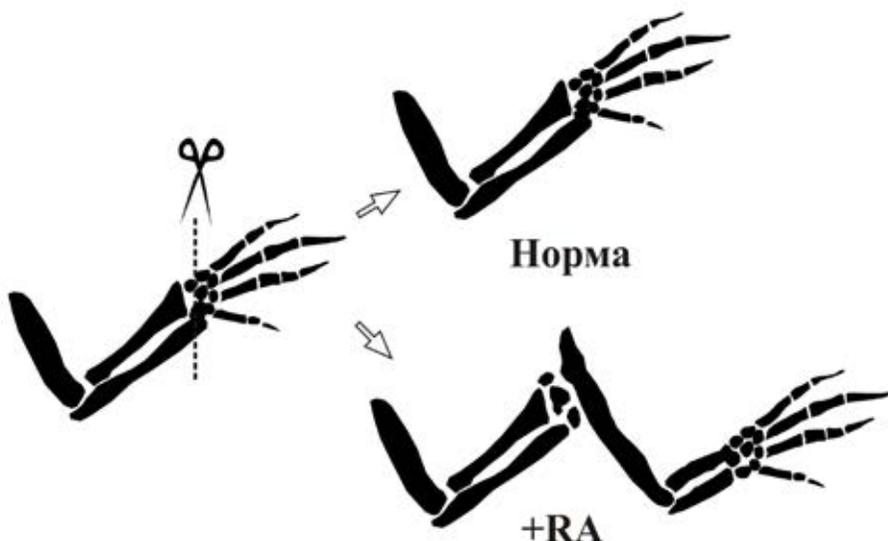
Кажется, что кластер Нох-генов – удобный инструмент для координации ростовых и регенерационных процессов. Это внутренняя «линейка», сверяясь с которой, наш червь быстро восстанавливает сначала «виртуальную»,

а затем и реальную осевую целостность. Вероятно, животные, умеющие смещать позиционные координаты тела, должны обладать выдающимися регенерационными талантами. Планария, свободноживущий плоский червь – хороший тому пример. Этот червь совсем не похож на полихету. У него нет сегментов, и он не растет всю жизнь. Зато он умеет целиком регенерировать из крошечного фрагмента, и Нох-гены планарии изменяют границы активности в согласии с новыми пропорциями тела [6]. Оказывается, что клетки любого фрагмента тела планарии могут перенастроить позиционную информацию таким образом, чтобы все значения разместились в новых границах. Получив такую инструкцию, стволовые клетки-необласти приступают к делениям, их потомки дифференцируются согласно новому «проекту» и в результате из маленького кусочка тела получается пусть крошечная, но целая планария.

Ну а как же пиявки? Оказывается, у взрослых пиявок Нох-гены «молчат». Все сегменты пиявок закладываются в эмбриогенезе. Поэтому взрослый червь не нуждается в сложных механизмах, контролирующих число сегментов и этапы их дифференцировки. В сущности, пиявки сильно упростились и специализировались, как часто бывает с паразитами. Их Нох-гены занимают в регуляторной иерархии подчиненное положение и нужны только для того, чтобы уточнить судьбу нейронов в ганглиях брюшной нервной цепочки в те сроки, когда и сами ганглии и сегменты, которые они иннервируют, уже оформились [7]. Если нервный ганглий травмировать, пиявка «вспомнит», какие Нох-гены работали во время эмбриогенеза, и включит их. Но поле их деятельности будет очень узким, и восстановятся только нарушенные связи между нейронами.

Хвостатые амфибии: тритоны, аксолотли и саламандры – умеют восстанавливать многие внутренние органы, хрусталик глаза, спинной мозг, конечности и хвост. На первых этапах регенерации хвоста или конечности область повреждения затягивается раневым эпителием, который начинает синтезировать сигнальные молекулы – ростовые факторы. Эти молекулы запускают в подлежащих тканях важный процесс. Те клетки, которые не могут изменить статус дифференцировки, вступают в апоптоз – запрограммированную клеточную гибель. Остальные начинают делиться и постепенно под раневым эпителием формируется регенерационная бластема – популяция клеток, похожих на эмбриональные. Оказалось, что Нох-гены «включаются» в бластеме таким же образом, как когда-то в эмбриональном зачатке, и управляют теперь уже восстановительным, а не эмбриональным морфогенезом. Биологи называю это явление «реституцией эмбрионального паттерна». Но каким же образом животное соотносит место ампутации органа и тот набор регуляторных генов, которые могут этот орган восстановить? Ведь новый хвост или ногу обычно не нужно отращивать «с нуля» – необходимо восстановить только часть? А дело вот в чем: клетки сохранившейся части органа содержат позиционную информацию, которая позволяет им правильно интерпретировать свое положение вдоль оси тела. Когда клетки, ближайшие к месту травмы, утрачивают специализацию и оказываются в бластеме, эта информация меняется, но с учетом уже существующей. Иными словами, клетки

бластемы формируют часть органа, а не целый потому, что «держат в уме» информацию о своей прежней позиции. И эта позиционная память определяется Нох-генами. Интересно, что ее можно «стереть». Клетки бластемы «забывают» свою прежнюю позицию, если обработать регенерат ретиноевой кислотой. У Нох-генов есть собственные транскрипционные регуляторы, запускающие их работу. Ретиноевая кислота – производное витамина А, как раз необходима для того, чтобы такие белки-регуляторы активировали часть Нох-кластера. Если количество ретиноевой кислоты превышает нормальный уровень, начинают работать те Нох-гены, которые в норме молчали, и клетки интерпретируют свою позицию вдоль оси неверно. В результате новая конечность растет «с нуля» (рис. 3).



**Рис. 3** Влияние ретиноевой кислоты (RA) на регенерацию конечности тритона.

Итак, получается, что способность к полноценной регенерации связана с деятельностью Нох-генов. Если эти гены принимают участие в построении тела животного и остаются активными во взрослом состоянии, то животное легко восстанавливает недостающую позиционную информацию.

Но как же быть с млекопитающими? У млекопитающих, как и у амфибий, Нох-гены работают на протяжении всей жизни. Почему же мы не можем восстанавливать конечности? На этот вопрос не ответить без дополнительных исследований, но уже сейчас ясно, что та позиционная информация, носителями которой являются Нох-белки, не может меняться у млекопитающих так же легко, как у червей или амфибий. Недавно обнаружилось, что фибробласты (клетки-строители соединительной ткани и важные участники процесса заживления ран) сильно различаются наборами работающих генов (в том числе, и Нох-генов) [8]. Фибробласты, взятые с ладонной и тыльной поверхностей человеческой кисти, мало отличаются друг от друга внешне, но они

носители разного «Нох-кода», и в них работают разные наборы генов-мишеней. Эта разница определяет структуру и состав внеклеточного матрикса, который производят фибробласты. Такую тонкую молекулярную настройку они получили от мезенхимных стволовых клеток, а те, в свою очередь, передавали ее в череде клеточных поколений с самого момента закладки, которая произошла в эмбриогенезе на этапе регионализации эмбриона Нох-генами.

Многие типы клеток в нашем организме получают строгую инструкцию о своем позиционном статусе еще на стадии эмбриона и никогда ее не меняют. Они в точности передают эти молекулярные настройки клеткам-потомкам, и те уходят в дифференцировку в полном согласии с полученными инструкциями. Зачем нужна такая строгость? Оказывается, если клетка получит неверные позиционные настройки, она не сможет нормально дифференцироваться в своем окружении. Сбой в программе дифференцировки может привести, в том числе, и к онкогенезу.

Как возникла такая сложная система? Возможно, разгадка кроется в теплокровности. Обмен веществ у теплокровных животных куда более интенсивный, чем у амфибий. Это значит, что время жизни отдельных клеток (например, клеток кишечника или клеток крови) сокращается. На их место должны встать новые клетки, а значит, нагрузка на популяцию стволовых клеток возрастает. Поддержание клеточного баланса в тканях – это, по своей сути, тоже регенерация, только она происходит постоянно. Называется такая регенерация «физиологической». Видимо, для теплокровных животных с их интенсивным обменом веществ и большим разнообразием тканей стойкость позиционной памяти и отлаженная физиологическая регенерация оказались важнее, чем умение отращивать конечности. Кроме того, у естественного отбора просто не было «материала» для работы в этом направлении. Теплокровное животное, получившее серьезную травму, не может полноценно питаться и восполнять энергетические потери, а значит, погибнет раньше, чем могли бы запуститься процессы восстановления потерянной части тела.

Сейчас уже понятно, что при всем многообразии животного мира, количество регенерационных стратегий вполне постигаемо. Эти стратегии часто зависят от программ развития животных и от эволюционных путей, которыми шли их очень далекие предки. Остается заметить, что фундаментальная наука выявила «подводные камни», которые надо учитывать в прикладных разработках. Вопросы фундаментальной биологии намного шире задач регенерационной медицины, но это как раз та область, где оба направления могут плодотворно сотрудничать.

## Литература

1. *Wagner et al.* Clonogenic neoblasts are pluripotent adult stem cells that underlie planarian regeneration // *Science*. 2011. 332: 811–816.
2. *Asakura et al.* Muscle satellite cells are multipotential stem cells that exhibit myogenic, osteogenic, and adipogenic differentiation // *Differentiation*. 2001 Oct;68(4–5):245–53.
3. *Porrello et al.* Transient Regenerative Potential of the Neonatal Mouse Heart // *Science* 2011: Vol. 331 no. 6020 pp. 1078–1080.

4. *Bakalenko et al.* Hox gene expression during postlarval development of the polychaete *Alitta (Nereis) virens* // *EvoDevo*. 2013; 4:13.
5. *Novikova et al.* Expression of Hox genes during regeneration of nereid polychaete *Alitta (Nereis) virens* (Annelida, Lophotrochozoa) // *EvoDevo*. 2013; 4:14.
6. Nogi and Watanabe. Position-specific and non-colinear expression of the planarian posterior (Abdominal-B-like) gene // *Develop. Growth Differ.* 2001;43, 177–184.
7. *Kourakis et al.* Conserved Anterior Boundaries of Hox Gene Expression in the Central Nervous System of the Leech *Helobdella* // *Developmental Biology*. 1997; 190, 284–300.
8. *Rinn et al.* Anatomic demarcation by positional variation in fibroblast gene expression programs // *PLoSGenet*. 2006; 2(7):e119.

# Реснички и жгутики – геометрическое совершенство, определяющее функции.

Р.Э. Узбеков, И.Б. Алиева

**Узбеков Рустем Эдуардович**  
доктор биологических наук, ассоциированный профессор факультета Биоинженерии и биоинформатики МГУ им. М.В. Ломоносова, научный инженер лаборатории Клеточной биологии и электронной микроскопии Университета Франсуа Рабле, Тур, Франция.

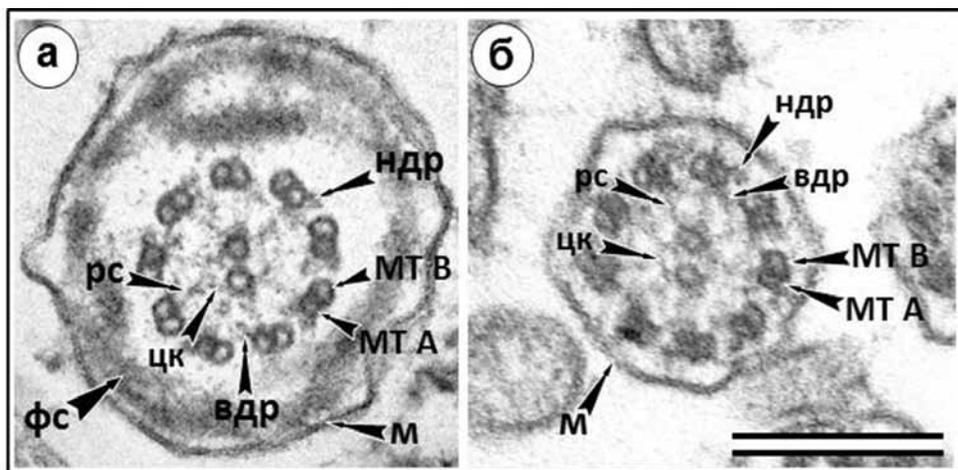
**Алиева Ирина Борисовна**  
доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник отдела электронной микроскопии Научно-исследовательского института физико-химической биологии им. А.Н. Белозерского, МГУ им. М.В. Ломоносова  
Проект РФФИ № 13-04-11515\_1,2

«Жгутик», «ресничка» – когда мы слышим эти не совсем «научные» термины в теле- или радиопередачах, посвященных биологии, первое, что приходит на ум – это жгутик одноклеточной водоросли эвглены зеленой и реснички инфузории со смешным названием «Туфелька», запавшие в память из курса зоологии средней школы. Жгутики и реснички, двигаясь, обеспечивают подвижность этих организмов. А кто-то, не совсем забывший школьную анатомию, вспомнит еще, что жгутики есть у подвижных мужских половых клеток – сперматозоидов. Все это верно. Но верно так же и то, что эти своеобразные биологические моторчики встречаются в клетках совершенно различных организмов: от простейших до человека – и значительно чаще, чем представляется нам из курса школьной биологии. Жгутики и реснички распространены очень и очень широко! И их внутренняя организация, их тонкое строение, которое исследователи рассмотрели и оценили в полной мере только в середине двадцатого века, после изобретения электронного микроскопа, поражают гармонией и поистине удивляют!

## Реснички и жгутики – сходство и различия.

Разумеется, первые естествоиспытатели, вооруженные только световым микроскопом, не могли видеть

всей той гармоничной красоты в строении ресничек и жгутиков, которая открылась современным исследователям, имеющим в своем арсенале электронный микроскоп. Ведь диаметр реснички составляет всего около 0,2 микрона – то есть, она в 400–500 раз тоньше человеческого волоса! В микроскоп эти едва различимые структуры были действительно похожи на волоски или реснички. Дополнительное сходство с ресницами человеческого глаза им придавало то, что они совершали движения, похожие на те, что совершают наши ресницы при моргании. Жгутики простейших получили свое название в связи с тем, что на поверхности клетки они часто формируются не в виде одиночных структур, а группами (пучками) и, переплетаясь, образуют своеобразные жгуты. Давая первые описания ресничек и жгутиков, биологи не могли еще знать, что эти клеточные образования имеют общий план строения, основу которого составляют специальным образом организованные компоненты клеточного цитоскелета – микротрубочки (МТ) – линейные полимеры, состоящие преимущественно из белка тубулина. Посмотрите на *рис. 1*. На первый взгляд может показаться, что на фотографиях «а» и «б» показаны срезы одной и той же структуры.



**Рис. 1** Поперечный срез через основную зону жгутика сперматозоида человека (а) и через среднюю зону реснички клетки эпителия яйцевода молочного поросенка (б). Обе структуры снаружи покрыты мембраной (м), содержат девять периферических дулетов МТ, состоящих из МТ «А» и МТ «В», пару центральных МТ, окруженные центральной капсулой (цк), соединенной с периферическими дулетами радиальными спицами (рс). От МТ «А» отходят наружные (ндр) и внутренние (вдр) динеиновые ручки. «Взгляд» на срезы со стороны базального тельца. Обе фотографии даны на одном увеличении, масштабный отрезок 0,2 микрона. Фото Р.Э. Узбекова

Однако на первой фотографии показан срез через основную зону жгутика сперматозоида человека, а на второй – срез реснички клетки эпителия яйцевода молочного поросенка. Сходное строение имеют осевые структуры (аксонемы) не только позвоночных животных, но и аксонемы таких эволюционно далеких

видов, как человек и одноклеточные жгутиковые простейшие. Таким образом, налицо удивительная консервативность структуры ресничек и жгутиков.

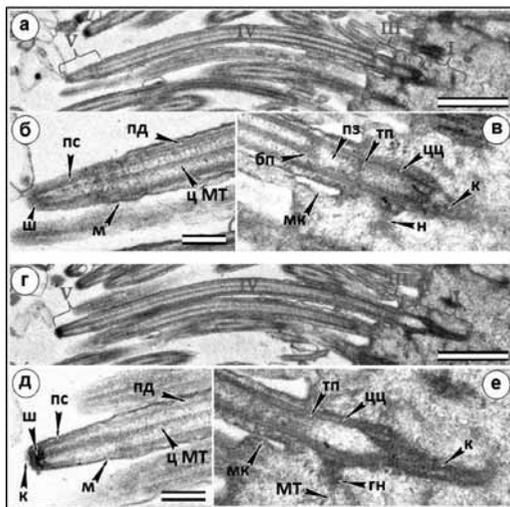
На приведенных фотографиях также видны и различия между жгутиком и ресничкой. Жгутики обычно относительно длиннее, чем реснички. Если мембрана реснички практически прилегает к аксонеме, то в жгутике между мембраной и аксонемой могут лежать дополнительные клеточные структуры, в данном случае, так называемый фиброзный слой основной зоны жгутика сперматозоида. Различные дополнительные образования встречаются, например, и в средней зоне жгутика сперматозоида: между аксонемой и клеточной мембраной там располагаются 9 наружных плотных фибрилл и митохондрии, обеспечивающие энергией процесс биения жгутика.

### Реснички и жгутики – производные центриоли.

Реснички и жгутики растут не сами по себе – в их основании всегда лежат центриоли. Если центриоли образуют комплекс с ресничками или жгутиками, их принято называть базальными тельцами, поскольку они лежат в основании (базе) этих органоидов. О центриолях и образуемых ими centrosомах мы писали в одной из наших предыдущих статей [1]. Здесь мы не будем подробно останавливаться на их уникальной ультраструктуре, упомянем лишь те особенности их строения, которые принципиальны в связи с темой, обсуждаемой в данной статье. Именно центриолям, с их центральной симметрией 9 порядка, реснички и жгутики обязаны своей оригинальной структурой. Почему центриоли имеют именно девять триплетов микротрубочек, было выяснено всего два года назад. Методами кристаллографии и электронной микроскопии было показано, что рост новых центриолярных цилиндров начинается с концентрации белка SAS-6 [23, 33]. Этот белок образует димеры, и эти димеры имеют способность к латеральному взаимодействию своими N-концевыми доменами. При этом угол между «хвостовыми» участками димеров составлял почти точно 40 градусов, т.е. комплекс из девяти димеров образует полное кольцо. Таким образом, *оригинальная форма белка SAS-6, имеющая ключевое значение для формирования симметрии девятого порядка в центриолях, определяет, в конечном итоге, специфическую структуру формируемых центриолями осевых структур: ресничек и жгутиков.*

Ультраструктура жгутика была впервые описана в сперматозоидах мха сфагнум [26] и млекопитающих [6], ультраструктура реснички – в клетках ресничного эпителия [10].

Стенка реснички и жгутика, в отличие от стенки центриолярного цилиндра, состоит не из 9 триплетов МТ, а из 9 дуплетов (то есть, 9 пар МТ) (*рис.1 цветной вкладки*). МТ дуплета являются продолжением «А» и «В» МТ центриолей. Кроме того, в большинстве подвижных ресничек и жгутиков в центральной части присутствуют еще две центральные МТ, и такие реснички принято обозначать формулой  $(9 \times 2 + 2)$ . Такая запись формулы призвана подчеркнуть, что центральные МТ (в отличие от периферических) не образуют дуплетов (*рис.1 цветной вкладки*). Формула первичной реснички  $(9 \times 2 + 0)$  показывает, что центральные МТ в ней отсутствуют. Такие реснички обычно неподвижны и принимают участие в различных проявлениях клеточной чувствительности.



**Рис. 2** Два последовательных продольных среза через ресничку клетки эпителия яйцевода молочного поросенка (а,г). На фотографиях (б,в) и (д,е) показаны базальные и апикальные участки реснички на большем увеличении. По морфологии комплекс реснички – базального тельца подразделяется на 5 зон: I – зона закрепления реснички в цитоплазме, содержащая корешки (к); II – базальное тельце; III – переходная зона (пз) реснички без центральных МТ; IV – основная зона; V – апикальная зона (зона синглетов и шапочки реснички). Ресничка снаружи покрыта мембраной (м), которая в переходной зоне образует мембранный карман (мк). На стенке центриолярного цилиндра (цц) имеется одна ножка (н), которая является гомологом перичентриолярного сателлита. С головкой ножки (гн) связаны цитоплазматические МТ (МТ). На своей апикальной части просвет базального тельца отграничен от реснички терминальной пластинкой (тп). Центральная пара МТ начинается на базальной пластинке (блп) на границе переходной и основной зон реснички. В апикальной части реснички периферические дуплеты (пд) МТ переходят в синглеты (пс), которые вместе с центральными МТ (цМТ) соединены с шапочкой (ш) на апикальном конце реснички. На поверхности мембраны в районе шапочки наблюдаются выросты, получившие название «корона реснички» (к). Масштабный отрезок 1 микрон (а,г), 0,2 микрона (б, в, д, е). Фото Р.Э. Узбекова

ниц МТ) и имеет диаметр 25 нм. К ней примыкает МТ «В», имеющая 11 собственных и 4 общих протофиламента с МТ «А» (*рис.1 цветной вкладки*). Поскольку общее количество протофиламентов в МТ «В» равно 15, ее диаметр несколько превышает диаметр МТ «А». Центральные МТ имеют 13 протофиламентов, как и большинство клеточных МТ. Они окружены общей центральной капсулой. Каждая МТ «А» связана с соседней МТ «В» нексиновой связкой, а также внешней и внутренней динеиновыми ручками. Кроме того, каждая МТ «А» связана с центральной капсулой радиальной спицей. В состав спиц входит более 20 различных белков, которые отличаются большой консервативностью [35].

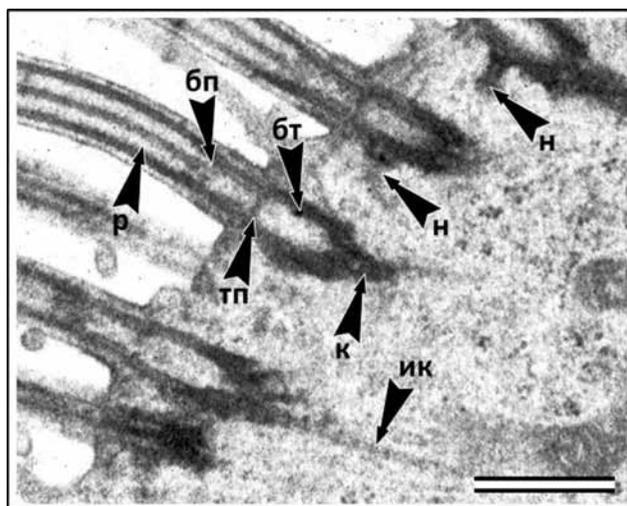
Кроме ресничек с «классической» формулой, в литературе описаны и более сложно устроенные реснички. Так, в гаметях некоторых паразитических простейших (грегарины), описаны реснички с формулами  $(6 \times 2 + 0)$ , то есть, состоящие из 6 дуплетов МТ без центральной пары, и даже с формулой  $(9 \times 2 + 5)$  – 9 дуплетов и 5 центральных МТ.

Как и в центриолях, МТ «А» в ресничках и жгутиках имеет на поперечном срезе округлую форму и состоит из 13 протофиламентов (структурных субъеди-

На *рис.1 цветной вкладки* показаны срезы через центральную часть жгутика или реснички. Очевидно, что по длине ресничка неоднородна, ее структура меняется. Рассмотрим подробнее эти изменения на продольных (*рис. 2 и 3*) и поперечных срезах (*рис. 4*) на примере реснички клетки эпителия яйцевода молочного поросенка.

Комплекс базальное тельце – ресничка может быть подразделен на несколько морфологически различающихся зон, рассмотрим их подробнее.

**I – Зона закрепления реснички в цитоплазме клетки.** Реснички и жгутики могут закрепляться в цитоплазме системой *исчерченных корешков* и специализированной системой МТ, которая достигает у некоторых жгутиконосцев большой сложности и является видоспецифичной. В клетках многоклеточных животных базальные тельца ресничек имеют *электронноплотные корешки* и, иногда,



**Рис. 3.** Срез через апикальную часть цитоплазмы клетки эпителия яйцевода молочного поросенка. Базальные тельца (бт) ресничек (р) связаны с электронноплотными корешками (к), один из корешков имеет поперечную исчерченность (исчерченный корешок – ик). Ножки (н) базальных телец все направлены в одну сторону. Хорошо заметны терминальная пластинка (тп), разделяющая просвет базального тельца и реснички и базальная пластинка (бп), от которой начинаются центральные МТ. Масштабный отрезок 0,5 микрон. Фото Р.Э. Узбекова

также связаны на проксимальной части с исчерченными корешками (*рис. 5*).

**II – Базальное тельце** представляет собой модифицированный центриольярный цилиндр, аналогичный таковому в составе centrosomes делящихся клеток. В отличие от centrosomes, центриоль базального тельца не имеет рядом парной ёцентриоли. *Ножка ба-*

*зального тельца* является структурой, гомологичной перицентриольярным сателлитам центриоли, однако в отличие от более многочисленных сателлитов, присутствует на базальном тельце, как правило, в единственном числе. Дистальные *придатки* [32] – структуры, связывающие центриольярный цилиндр базального тельца реснички с клеточной мембраной, располагаются по одному на каждом из девяти триплетов на границе II и III зон (*рис. 4м*). В составе придатков идентифицированы несколько важных centrosomальных

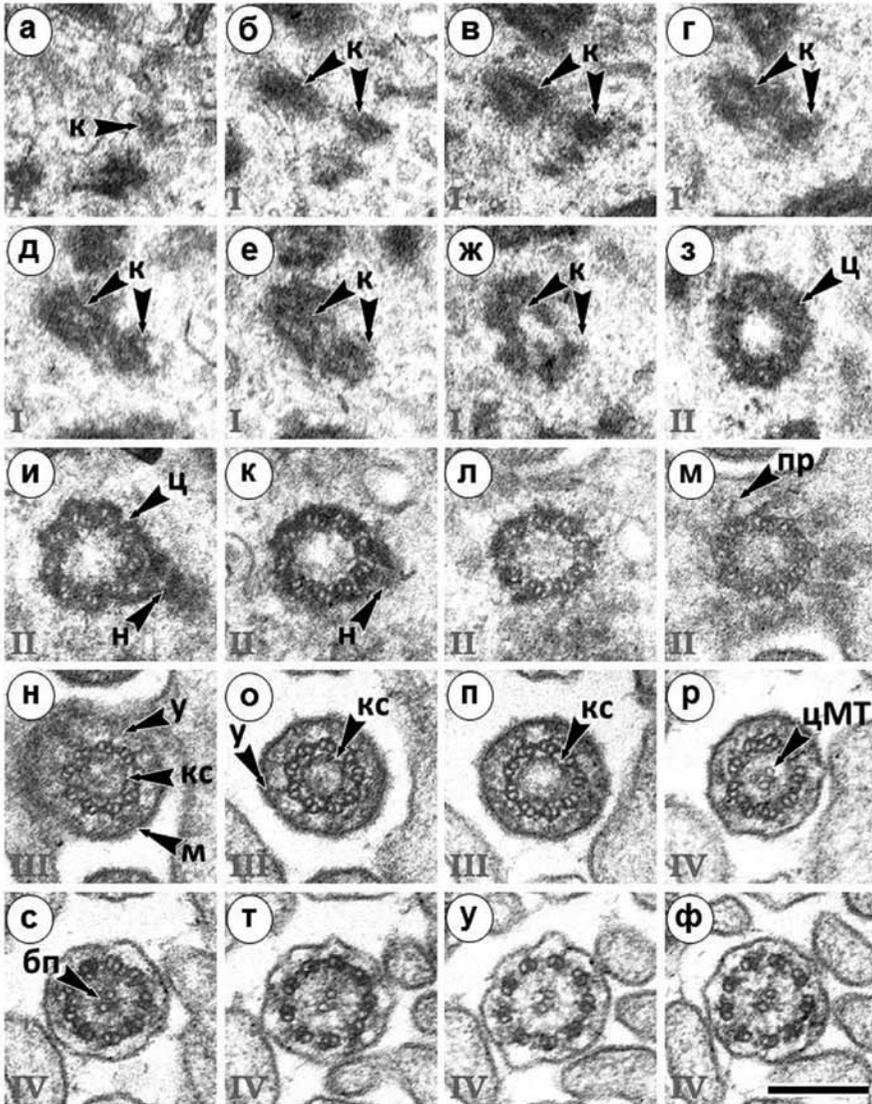
белков, в частности, белки ODF2 и CEP164. Подавление функции (нокаут) первого из этих белков в клетках мыши приводило к серьезным нарушениям: придатки отсутствовали и не происходило удлинения аксонемы реснички [18]. Подавление продукции (экспрессии) белка CEP164 вызывало еще более катастрофические последствия – реснички вообще не формировались [16].

**III – Переходная зона**, в которой ресничка имеет формулу  $(9 \times 2 + 0)$  – то есть, в отличие от базального тельца, здесь имеются периферические дуплеты, но центральные МТ отсутствуют. Просвет центриолярного цилиндра ограничен от просвета реснички электронноплотной перегородкой (*рис. 4в, 5, 6б*), которая получила название *терминальной пластинки* [14].

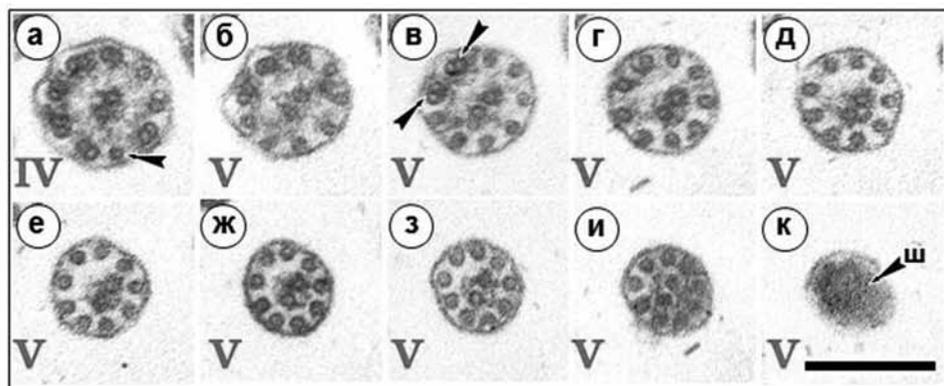
Следует отметить, что диаметр аксонемы реснички (около 165 нм) в этой зоне меньше, чем диаметр центриоли (около 200 нм), что логично, поскольку триплеты центриоли «потеряли» МТ «С» и сменились дуплетами реснички (*рис. 5, 6а, 6в*).

Под воздействием различных факторов ресничка может «отломиться» от клетки. При этом реснички отламываются на уровне базальной пластинки (см. далее), переходная зона остается связанной с центриолярным цилиндром базального тельца. Сброс ресничек связан с активностью белка катанина, способного перерезать МТ. Катанин локализован в дистальной части переходной зоны [25]. При резорбции реснички в процессе перехода от интерфазы к митозу у одноклеточной водоросли хламидомонады жгутик обламывается на уровне придатков [22]. И в этом случае «освобождение» центриолярного цилиндра от функции базального тельца требует активности белка катанина. Другой тип структур, характерных для переходной зоны – это система связей между дуплетами МТ и мембраной реснички. Эти связи несколько отличаются по форме в различных объектах, что и обусловило разнообразие названий, которые были им даны разными авторами: *мостики* (bridges – [29]), *структуры, подобные бутылкам шампанского* (champagne-glass structures – [14]), *радиальные линкеры* (radial linkers – [1]), *выступы внешних дуплетов* (doublet outer projections – [74]), *кольшки* (pegs – [9]), *латеральные выступы* (lateral projections – [4]), *T-образные волокна* (T-shaped fibres – [12]) и *Y-образные связки* (Y-shaped connectors – [27]). Мы будем использовать последний из перечисленных терминов (*рис. 4 н, о*).

Эти структуры особенно развиты в удлиненной переходной зоне ресничек фоторецепторов в жгутиках лейшмании и первичных ресничках в клетках почки [15, 17]. В переходной зоне локализовано несколько специфических белков. В базальной части переходной зоны выявлен белок 210 kDa [24]. Нефроцистин (nephrocystin, NPHP1), адапторный белок, связанный с сигнальными молекулами и участвующий в организации актинового цитоскелета, вероятно, вовлечен в регуляцию цилиарного транспорта [20, 21], поскольку его потеря приводит к аккумуляции транспортируемых вдоль реснички грузов в районе базального тельца. Центросомальный белок CEP290 задействован в формировании Y-образных связей аксонемы с мембраной реснички [8]. Описанные белки крайне важны и для человека – при нарушениях функции реснички (цилиопатиях) у человека наблюдаются мутации как по NPHP1, так и по CEP290 [34].



**Рис. 4.** Двадцать серийных последовательных поперечных срезов через ресничку клетки эпителия яйцевода молочного поросенка. В левом нижнем углу каждой фотографии указана зона комплекса реснички – базальное тельце, которому соответствует этот срез (рис. 3). I – зона закрепления реснички в цитоплазме, содержащая корешки (к); II – базальное тельце; III – переходная зона реснички без центральных МТ; IV – основная зона. На стенке центриоли (ц) имеется одна ножка (н). В переходной зоне между центриолью и ресничкой видны придатки (пр). Аксонема реснички соединена с мембраной «игрек-образными» связками (у). Внутри аксонемы имеется кольцеобразная связка (кс). Базальные части центральных МТ (цМТ) погружены в базальную пластинку (бп). Масштабный отрезок 0,2 микрона. Фото Р.Э. Узбекова



**Рис. 5** Десять серийных последовательных поперечных срезов через конец реснички клетки эпителия яйцевода молочного поросенка. В левом нижнем углу каждой фотографии указана зона комплекса ресничка – базальное тельце, которому соответствует этот срез: IV – основная зона; V – апикальная зона (зона синглетов и шапочки реснички) [рис. 20]. Масштабный отрезок 0,2 микрона. Фото Р.Э. Узбекова

В переходной зоне, в местах контактов Y-образных связок с мембраной реснички, на самой мембране реснички (до места ее контакта с клеточной мембраной), обнаруживаются ряды глобул, которые получили название *ожерелья* (necklace). Ожерелье типично как для подвижных, так и неподвижных ресничек, количество рядов глобул может варьировать с широкими пределами от 1 до 40, но для большинства изученных объектов составляет от 3 до 8 [11]. Вариации наблюдаются не только у разных видов, но и в разных типах клеток одного вида и даже в клетках одной и той же ткани, что позволяет сделать вывод о динамичности этой структуры и зависимости ее от функционального состояния клетки. Считается, что главной функцией глобул ожерелья является создание селективного барьера для белков и липидов между мембранами реснички и клетки, который предотвращает миграцию больших интрамембранных белковых комплексов в мембрану реснички [3].

**IV – Основная зона** – самая протяженная и наиболее подробно изученная, в которой появляются центральные МТ и в которой ресничка имеет формулу  $(9 \times 2 + 2)$ . В районе появления центральных МТ отмечается присутствие небольшого количества электронноплотного материала (*рис. 5, в, с*). В некоторых случаях эта структура более выражена и получила название «аксиальное зерно», «аксосома» или «базальная пластинка» [14]. В отличие от терминальной пластинки, которая закрывает весь просвет реснички, базальная располагается только в центральной ее части. У водорослей и низших растений базальная пластинка имеет сложную организацию и состоит из двух слоев, каждый из которых представляет из себя девятилучевую звезду, лучи которой прикрепляются к «А» МТ дуплетов [30]. На продольном срезе базальная пластинка в этих объектах выглядит как буква «Н», в которой перекладина – это сама базальная пластинка, а вертикальные (точнее, несколько наклонные)

линии – система связок. Интересно отметить, что отсутствие базальной пластинки в *vfl2* мутантах хламидомонады по белку центрину сопровождалось проникновением центральных МТ жгутика внутрь базального тельца [19].

**V – Апикальная зона** (зона синглетов), где МТ «В» дуплетов исчезают и остаются только МТ «А», то есть дуплеты трансформируются в синглеты МТ. По данным одних авторов, все дуплеты переходят в синглеты на одном уровне [5, 29], по другим данным, МТ «В» различных дуплетов имеют различную длину [13, 31]. Указанные различия могут быть связаны как с межвидовыми различиями, так и с различным функциональным состоянием изученных ресничек. В рассматриваемой нами модели дуплеты сменяются на синглеты последовательно, начиная с нижнего правого угла (первый «появившийся» синглет показан стрелкой на *рис. 6а*) в направлении левого верхнего (последние оставшиеся дуплеты показаны стрелками на *рис. 6б*), что, вероятно, связано с изменением формы реснички.

Как же происходит движение ресничек и жгутиков? Биение ресничек и жгутиков обеспечивается за счет смещения дуплетов МТ друг относительно друга, смещение дуплетов связано с продольным перемещением динеиновых ручек по соседним дуплетам, происходящим в присутствии АТФ (*рис. 2*). Считается, что внешние динеиновые ручки ответственны за частоту биения, а внутренние за генерацию силы [28, 11]. Реснички осуществляют «биение» в одной плоскости. «Гребок» происходит в положении максимального распрямления, а возврат в исходное положение – перемещением вдоль тела клетки, аналогично движению рук при плавании стилем «брас».

Реснички в процессе своего движения проходят несколько фаз, при этом движение ресничек каждой клетки и всех соседних клеток эпителия строго согласованно. Благодаря сложной системе регуляции, детали которой до сих пор не вполне ясны, все реснички находятся в переходящих одна в другую фазах. Благодаря тому, что каждая предыдущая ресничка опережает последующую на определенный промежуток времени, вся поверхность волнообразно движется, как бы «мерцает». Отсюда и другое название ресничного эпителия – «мерцательный» эпителий.

### **Зачем нам реснички и жгутики?**

Кроме обеспечения индивидуальной подвижности клеток, как у простейших и сперматозоидов, жгутики и реснички могут обеспечивать перемещение жидкости вдоль клеточной поверхности, что характерно для ресничного эпителия дыхательных путей, яйцеводов, евстахиевых труб, семявыносящих канальцев, спинномозгового канала и желудочков мозга. Кроме того, в нашем организме имеются реснички, видоизменившиеся в специализированные чувствительные антенны.

Вдыхая в себя воздух на пыльной улице, мы не задумываемся о том, сколько работы мы задаем собственным клеткам ресничного эпителия бронхов. Спасая нас от неприятностей, реснички эпителия неумолимо гонят расположенную на поверхности клеток защитную слизь с прилипшими к ней частицами из бронхов наружу. А курильщики еще и травят собственных микроскопических помощников, создавая переизбыток инородных частиц

на поверхности эпителия. Тогда реснички-спасатели уже не справляются с объемом поступающей грязи, и организм вынужден защищать себя уже на макроскопическом уровне – рефлекторным сокращением мышц – кашлем.

Евстахиева (слуховая) труба – тонкий канал, соединяющий полость среднего уха с глоткой и служащий для выравнивания давления, также выстлан изнутри ресничным эпителием, который выполняет сходные функции с бронхиальным эпителием – защищает от попадания пыли и бактерий среднего уха. Если он по каким-то причинам не справляется с этой функцией, то развивается воспаление среднего уха – отит.

Яйцеклетка, в отличие от сперматозоида, не имеет ни ресничек, ни жгутиков, а ведь ей после оплодотворения необходимо переместиться к месту своего прикрепления в матке – то есть, преодолеть гигантское (даже для этой самой большой клетки нашего организма) расстояние! И тут снова приходят на помощь реснички, которые образуются на поверхности клеток эпителия яйцевода. Они нежно подхватывают яйцеклетку и переносят ее, передавая «с рук на руки». Им в этом помогают рефлекторные сокращения мышечных стенок яйцевода. Сперматозоидам, правда, приходится плыть против течения почти до самого начала яйцевода, где и происходит их встреча с яйцеклеткой, но для решения этой задачи природа наградила их мощным жгутиком.

Как известно, наш мозг отделен от всего остального организма так называемым гемато-энцефалическим барьером, поэтому кровь, нагнетаемая сердцем, непосредственно нервных клеток не достигает. И тут снова нам помогают реснички, которыми выстланы изнутри спинномозговой канал и желудочки мозга.

Более того, в процессе эмбрионального развития от направления биения единственной реснички на так называемом нодальном бугорке зависит будущее расположение всех наших внутренних органов! Вот уж поистине, подвижные реснички и жгутики – многофункциональные образования, без которых организму не прожить!

Реснички участвуют и в обеспечении сенсорной функции клеток: видоизменившись, они превратились в чувствительные элементы тканей органов чувств. Палочки и колбочки, которые выполняют функцию восприятия света – это производные ресничек. Хеморецепторы обонятельного эпителия – также специализированные производные ресничек.

Случайно возникнув у наших далеких зеленых одноклеточных предков, ресничка прошла долгий путь эволюции, но и через миллионы лет сохранила основные элементы однажды возникшей структуры. Бактерии пошли другим путем, совершенствуя свой мембранный мотор и... так и остались бактериями. Реснички же инфузорий и жгутики одноклеточной водоросли эвглены стали своеобразной ступенью для дальнейшего развития клеток и превращения их в многоклеточные организмы – создали первые предпосылки специализации различных частей одноклеточного организма, а затем помогли потомкам этих организмов перейти к многоклеточности и специализации уже на организменном уровне. Но и на новой ступени эволюционного развития реснички не были утрачены клетками, обеспечивая

формирование все новых специализированных тканей, о которых мы кратко рассказали в настоящей статье.

## Литература

1. *Узбеков Р.Э., Алиева И.Б.* (2007) Центросома — клеточный концертмейстер. Природа, № 5, стр. 3–12.
2. *Anderson R.G.W.* (1974) Isolation of ciliated or unciliated basal bodies from rabbit oviduct. *J. Cell Biol.* 60, 393–404.
3. *Boisvieux-Ulrich E., Sandoz D., Chailley B.* (1977) A freeze-fracture and thin section study of the ciliary necklace in quail oviduct. *Biol. Cell.* 30, 245–252.
4. *Breipohl W., Mendoza A.S., Miragall F.* (1980) Freeze-etching studies on the ciliary necklace in the rat and chick. *J. Anat.* 130, 801–807.
5. *Brightman M.W., Palay S.L.* (1963) The fine structure of ependyma in the brain of the rat. *J. Cell Biol.* 19, 415–439.
6. *Burgos M.H., Fawcett D.W.* (1955) Studies on the fine structure of the mammalian testis. I. Differentiation of the spermatids in the cat (*Felis domestica*). *J. Biophys. Biochem. Cyt.* 1(4): 287–300.
7. *Cavalier-Smith T.* (1974) Basal body and flagellar development during the vegetative cell cycle and the sexual cycle of *Chlamydomonas reinhardtii*. *J. Cell Sci.* 16, 529–556.
8. *Craige B., Tsao C.C., Diener D.R., Hou Y., Lechtreck K.F., Rosenbaum J.L., Witman G.B.* (2010) CEP290 tethers flagellar transition zone microtubules to the membrane and regulates flagellar protein content. *J. Cell Biol.* 190, 927–940.
9. *Dute R., Kung C.* (1978) Ultrastructure of the proximal region of somatic cilia in *Paramecium tetraurelia*. *J. Cell Biol.* 78, 451–464.
10. *Fawcett D.W., Porter K.R.* (1954) A study of the fine structure of ciliated epithelia. *J. of Morphology.* 94: 221–282.
11. *Fisch C., Dupuis-Williams P.* (2011) Ultrastructure of cilia and flagella – back to the future! *Biol Cell.* 103(6):249–270.
12. *Geimer S., Melkonian M.* (2004) The ultrastructure of the *Chlamydomonas reinhardtii* basal apparatus: identification of an early marker of radial asymmetry inherent in the basal body. *J. Cell Sci.* 117, 2663–2674.
13. *Gibbons I.R., Grimstone A.V.* (1960) On flagellar structure in certain flagellates. *J. Biophys. Biochem. Cytol.* 7: 697–716.
14. *Gilula N.B., Satir P.* (1972) The ciliary necklace. A ciliary membrane specialization. *J. Cell Biol.* 53, 494–509.
15. *Gluznig E., Hoog J.L., Smith A.E., Dawe H.R., Shaw M.K., Gull K.* (2010) Beyond 9+0: noncanonical axoneme structures characterize sensory cilia from protists to humans. *FASEB J.* 24, 3117–3121.
16. *Graser S., Stierhof Y-D, Lavoie S.B., Gassner O.S., Lamla S., Le Clech M., Nigg E.A.* (2007) Cep164, a novel centriole appendage protein required for primary cilium formation *The Journal of Cell Biology.* – Vol. 179, No. 2. – October 22, 2007. 321–330
17. *Horst C.J., Forestner D.M., Besharse J.C.* (1987) Cytoskeletal-membrane interactions: a stable interaction between cell surface glycoconjugates and doublet microtubules of the photoreceptor connecting cilium. *J. Cell Biol.* 105, 2973–2987.

18. *Ishikawa H., Kubo A., Tsukita S., Tsukita S.* (2005) Odf2-deficient mother centrioles lack distal/subdistal appendages and the ability to generate primary cilia. *Nature Cell Biol.*, 7(5), 517–524.
19. *Jarvik J.W., Suhan J.P.* (1991) The role of the flagellar transition region: inferences from the analysis of a *Chlamydomonas* mutant with defective transition region structures. *J. Cell Sci.* 99, 731–740.
20. *Jauregui A.R., Nguyen K.C., Hall D.H., Barr M.M.* (2008) The *Caenorhabditis elegans* nephrocystins act as global modifiers of cilium structure. *J. Cell Biol.* 180, 973–988.
21. *Jiang S.T., Chiou Y.Y., Wang E., Chien Y.L., He H.H., Tsai F.J., Lin C.Y., Tsai S.P., Li H.* (2009) Essential role of nephrocystin in photoreceptor intraflagellar transport in mouse. *Hum. Mol. Genet.* 18, 1566–1577.
22. *Johnson U.G., Porter K.R.* (1968) Fine structure of cell division in *Chlamydomonas reinhardi*. Basal bodies and microtubules. *J. Cell Biol.* 38, 403–425.
23. *Kitagawa D., Vakonakis I., Olieric N., Hilbert M., Keller D., Olieric V., Bortfeld M., Erat M.C., Flückiger I., Gönczy P., Steinmetz M.O.* (2011) Structural basis of the 9-fold symmetry of centrioles. *Cell*;144(3):364-375.
24. *Lechtreck K.F., Teltenkötter A. and Grunow A.* (1999) A 210 kDa protein is located in a membrane-microtubule linker at the distal end of mature and nascent basal bodies. *J. Cell Sci.* 112, 1633–1644.
25. *Lohret T.A., Zhao L., Quarmby L.M.* (1999) Cloning of *Chlamydomonas* p60 katanin and localization to the site of outer doublet severing during deflagellation. *Cell Motil. Cytoskeleton* 43, 221–231.
26. *Manton I., Clarke B.* (1952) An electron microscope study of the spermatozoid of *Sphagnum*. *J. Exp. Bot.* 3, 265–275.
27. *O'Toole E.T., Giddings Jr.T.H., Dutcher S.K.* (2007) Understanding microtubule organizing centers by comparing mutant and wild-type structures with electron tomography. *Methods Cell Biol.* 79, 125–143.
28. *Porter M.E., Sale W.S.* (2000) The 9+2 axoneme anchors multiple inner arm dyneins and a network of kinases and phosphatases that control motility. *J. Cell Biol.* 151, F37–F42.
29. *Reese T.S.* (1965) Olfactory cilia in the frog. *J. Cell Biol.* 25, 209–230.
30. *Ringo D.L.* (1967) Flagellar motion and fine structure of the flagellar apparatus in *Chlamydomonas*. *J. Cell Biol.* 33, 543–571.
31. *Roth L.E., Shigenaka Y.* (1964) The structure and formation of cilia and filaments in rumen protozoa. *J. Cell Biol.* 20, 249–270.
32. *Sorokin S.P.* (1968) Reconstructions of centriole formation and ciliogenesis in mammalian lungs. *J. Cell Sci.* 3: 207–230.
33. *Van Breugel M., Hirono M., Andreeva A., Yanagisawa H.A., Yamaguchi S., Nakazawa Y., Morgner N., Petrovich M., Ebong I.O., Robinson C.V., Johnson C.M., Veprintsev D., Zuber B.* (2011) Structures of SAS-6 suggest its organization in centrioles. *Science.* 331(6021):1196–1199.
34. *Wolf M.T., Hildebrandt F.* (2011) Nephronophthisis. *Pediatr. Nephrol.* 26, 181–194. *Woolley D.M., Nickels S.N.* (1985) Microtubule termination patterns in mammalian sperm flagella. *J. Ultrastruct. Res.* 90, 221–234.

35. Yang P., Diener D.R., Yang C., Kohno T., Pazour G.J., Dienes J.M., Agrin N.S., King S.M., Sale W.S., Kamiya R., Rosenbaum J.L., Witman G.B. (2006) «Radial spoke proteins of *Chlamydomonas* flagella» *J. Cell Sci.* 2006 Mar 15; 119 (Pt 6):1165–1174.

# Эволюционная «гонка вооружений»: нейротоксины *versus* ионные каналы.

А.О. Чугунов, А.А. Василевский

*Антон Олегович Чугунов,*  
кандидат физико-математических наук, научный сотрудник  
Лаборатории моделирования биомолекулярных систем ИБХ РАН (<http://model.nmr.ru>), Автор научно-популярного сайта «биомолекула» (<http://biomolecula.ru>).

*Александр Александрович Василевский,*  
кандидат химических наук, старший научный сотрудник  
Лаборатории нейрорецепторов и нейрорегуляторов ИБХ РАН  
Проект РФФИ № 13-03-11520

Биологическая эволюция – общая форма существования живой материи. При детальном рассмотрении оказывается, что виды почти никогда не эволюционируют поодиночке: обычно в этом принимают участие их экологические партнеры, и изменение происходит в парах паразит–хозяин или хищник–жертва. Более того, коэволюцию часто можно проследить на молекулярном уровне, когда один вид совершенствует систему нападения, а второй вслед за ним – систему защиты (и наоборот). Параллель с холодной войной здесь настолько очевидна, что соответствующий феномен даже получил название эволюционной «гонки вооружений». Примером наиболее эффективных и элегантных систем нападения служат животные яды, содержащие в своем составе нейротоксины – вещества, воздействующие на нервную систему и мышцы жертвы.

Несмотря на детальную проработку теории эволюции профессионалами и многочисленные примеры, вошедшие в учебники и популярную литературу [1], воплощение эволюционного процесса зачастую настолько причудливо, что исследование изменений в живых организмах может быть интересно далеко не только ученым-теоретикам. Известно, что у эволюции нет воли и цели: живые

организмы меняются, чтобы оставить максимальное потомство, а не чтобы достичь абстрактного совершенства [2]. Так, эволюционно прогрессивным признаком считается то, что позволяет лучше приспособиться к окружающим условиям в данный момент, а не красота или сложность устройства сами по себе.

Например, антарктическая ледяная рыба утратила гены гемоглобина из-за того, что условия ее обитания – нулевая или даже отрицательная (!) температура воды, растворимость кислорода в которой достаточно высокая, чтобы обеспечивать ткани этим газом просто за счет диффузии и усиления кровотока. Можно сказать, что в этом случае рыба «экономит» на гемоглобине [3]. Другие рыбы, которые живут в пещерах и никогда не выплывают на белый свет или обитают на очень больших глубинах, почти всегда за ненадобностью теряют зрение. Степень упрощения строения паразитических организмов вообще поражает воображение, причем в случае бактерий это приводит к кардинальному упрощению всего генетического аппарата: например, геном микоплазмы содержит всего около 500 генов, а у облигатного внутриклеточного симбионта *Candidatus Carsonella rudii* и вовсе 182 гена [4]. И все перечисленное – прогрессивные признаки, поскольку они позволили упомянутым организмам максимально пластично адаптироваться к обстановке, в которой они обитают. Более известный (и более «благородный») пример – эволюция человека, где развитие пошло по пути усложнения нервной системы и способности к коммуникации, а также к становлению богатой культуры, современное состояние которой мы имеем удовольствие ежедневно наблюдать вокруг. Одновременно возросла роль полового отбора и образования семей [5], – и все это тоже проделки эволюции [6].

В нашей статье речь пойдет об особой разновидности эволюционного процесса, которую можно назвать «гонкой вооружений» и в которой участвуют две стороны: нападающая и обороняющаяся (или «догоняющая» и «убегающая»). Чрезвычайно любопытно наблюдать «гонку» на молекулярном уровне. Поскольку изменение одной стороны согласовано с изменением второй, то и гонку вооружений иногда можно довольно подробно проследить по «молекулярной летописи» процессов, происходящих внутри живых организмов.

## Уроки холодной войны

Вторая половина XX в., кроме замечательных открытий в молекулярной биологии, была ознаменована холодной войной – глобальной конфронтацией между социалистическим и капиталистическим строями. Это противостояние породило эффект гонки вооружений – процесс борьбы за военное превосходство с положительной обратной связью, вызвавший гипертрофию военно-промышленных комплексов СССР и США.

Похожий эффект наблюдается и в процессе коэволюции двух видов, связанных друг с другом в системе «хищник–жертва» или «паразит–хозяин»: изменение одного из видов неизбежно влечет изменение второго для сохранения паритета или получения превосходства. Простейший пример эволюционной гонки вооружений – газели и гепарды, каждому из которых приходится бегать из поколения в поколение все быстрее и быстрее, чтобы одному ускользнуть из пасти, а другому – остаться сытому.

## Эволюционная гонка вооружений, или принцип Черной королевы

Подчеркивая параллель с холодной войной, биологи ввели понятие эволюционной гонки вооружений (англ. *evolutionary arms race*), приписывая этому процессу роль важнейшей движущей силы эволюции [7]. Более строго это понятие сформулировано в форме «принципа Черной Королевы», утверждающего, что в коэволюционных отношениях каждому из видов приходится «бежать со всех ног, чтобы только остаться на том же месте» (эта цитата из «Алисы в Зазеркалье» удачно передает суть принципа). Прямое экспериментальное подтверждение принципа Черной королевы получено на микроскопических рачках дафниях и их паразитических бактериях: «воскресив» из донного ила несколько поколений тех и других, биологи показали, что самые опасные для дафний паразиты – современные им, тогда как «прошлые» и «будущие» популяции бактерий заражали рачков с меньшей эффективностью [8].

### Око за око, ген за ген

Хорошим примером эволюционной гонки вооружений являются растения с их паразитами. Во многих случаях наблюдается строгое соответствие системы устойчивости растения системе вирулентности его паразита. Более того, это соответствие сводится всего лишь к двум генам: гену растения, позволяющему противостоять заражению (гену резистентности, R) и гену паразита, необходимому для инфекции (гену авирулентности, Avr). Такие межвидовые отношения получили название «ген за ген» (англ. *gene-for-gene*) [9]. Растения, содержащие ген R, оказываются устойчивыми по отношению к паразитам с соответствующим геном Avr. Как правило, гены резистентности растений кодируют белки-рецепторы, детектирующие появление паразита. Теперь паразит стремится изменить свой Avr-ген так, чтобы ускользнуть от узнавания рецептором растения. И наоборот, растение изменяет свой R-ген, чтобы по-прежнему детектировать заражение.

### Вариация фаз

Одно из наиболее прогрессивных эволюционных приобретений высших позвоночных – развитая иммунная система, основанная на принципе комбинаторики и позволяющая противостоять практически любому чужеродному организму [10, 11]. Однако бактерии и вирусы не сдаются, им тоже есть что предьявить из своего арсенала. Хорошо известный пример – постоянно мутирующий вирус гриппа, к которому необходимо получать все новые и новые вакцины [12]. Другой, не менее поразительный, пример – явление «смены фаз» у бактерий, заключающееся в случайном изменении фенотипа с высокой частотой, намного превышающей частоту обычных мутаций. Так, сальмонеллы используют этот прием для замены белка флагеллина, из которого построены бактериальные жгутики и который служит сигналом для запуска иммунологических реакций. Только у хозяина разовьется иммунный ответ, как сальмонелла меняет тип флагеллина и ускользает [13]!

## Ядовитый арсенал

Пожалуй, самым эффективным средством как нападения, так и защиты служат яды, которые в процессе эволюции научились вырабатывать разнообразнейшие животные: многие кишечнополостные, членистоногие, моллюски, хордовые и другие (*рис.1 цветной вкладки*). Присутствующие в ядах молекулы называют токсинами, а в том частном (но распространенном) случае, когда мишенью их действия служит нервная система и/или мышцы, – нейротоксинами.

Состав яда животных различен: если, допустим, в яде пчелы присутствуют всего два основных компонента – мембрано-активный пептид мелиттин и гидролизующий липиды фермент фосфолипаза А<sub>2</sub>, – то в яде пауков, скорпионов, морских анемонов и конусов, а также змей содержатся десятки, а иногда сотни или даже тысячи компонентов различной химической природы. Наблюдаемое в ядах разнообразие компонентов одного структурного типа сегодня принято описывать термином «эволюционно отредактированная комбинаторная библиотека» [14]. Эти молекулы обладают различной эффективностью и специфичностью в отношении разных рецепторов, а результирующая смесь токсинов эффективна в отношении широкого круга мишеней.

Эволюционное преимущество богатого арсенала – способность «следовать» за жертвой: если мишень действия основного компонента яда начнет ускользать (например, рецептор мутирует), в яде с большой вероятностью обнаружится слабо представленный, но более активный по отношению к новой форме рецептора токсин, и теперь уже ему суждено будет стать основой «вооружения» у будущих поколений ядовитых хищников.

### «Всенепрременнейше захватите телеграф!»

Как уже было сказано, частой мишенью действия ядов является нервная система, а поэтому основой арсенала многих ядовитых гадов – нейротоксины. Связано это, по-видимому, с тем, что нарушить работу сложной системы проще всего, уничтожив коммуникацию – что было отмечено еще в работах Ленина, рекомендовавшего в случае захвата власти в первую очередь взять под контроль телефон, телеграф и железнодорожные станции. «Телеграфом» нашего организма является нервная сеть, передача сообщений в которой основана на феномене потенциала действия, распространяющегося вдоль мембран нейронов. В состоянии покоя поддерживается определенная разница концентраций ионов ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ) внутри нейронов и снаружи и формируется потенциал покоя [15]. Рабочими элементами потенциала действия служат ионные каналы – мембранные белки, пропускающие те или иные ионы по команде. В частности, начинается потенциал действия с активации потенциалчувствительных натриевых ( $\text{Na}^+$ ) каналов (ПЧНК), открывающихся в ответ на уменьшение трансмембранной разности потенциалов (дполяризацию). Интересно, что появление ПЧНК в эволюции животных тесно связано с дифференцировкой тканей и обособлением нервной системы. О них и поговорим подробнее, оставив другие каналы за рамками нашей статьи.

Каждый ПЧНК состоит из очень длинной полипептидной цепи (около 2 тысяч остатков аминокислот), которая представлена четырьмя похожими повторами (*рис.2 цветной вкладки*). При этом в пространстве канал составлен из пяти частей (или доменов). В образовании единственного порового домена (ПД) участвуют все повторы полипептидной цепи, в его центре формируется селективная для ионов  $\text{Na}^+$  пора. Четыре – по одному от каждого повтора – потенциал-чувствительных домена (ПЧД) расположены вокруг центрального ПД [16]. Функция ПЧД – реагировать на изменение мембранного потенциала и передавать команду на открытие поры.

ПЧНК являются ключевым компонентом передачи нервных импульсов, а значит и работы нервной системы вообще. Очевидно, именно этим обусловлено существование огромного числа токсинов, связывающихся с ПЧНК и так или иначе нарушающих их работу (*рис.3 цветной вкладки*). В свою очередь, нарушение работы ПЧНК приводит к параличу, судорогам, а смерть наступает, как правило, от остановки дыхания. Например, тетродотоксин, содержащийся в знаменитом японском деликатесе рыбе фугу и некоторых других животных, блокирует пору натриевого канала подобно пробке. Интересно, что тетродотоксин используется чаще в целях защиты. И здесь хорошо исследован пример гонки вооружений: некоторые тритоны используют тетродотоксин для защиты от хищников, а охотящиеся на этих тритонов змеи приобретают устойчивость в результате мутации генов ПЧНК [17]. К блокаторам относятся небольшие пептиды  $\mu$ -конотоксины, являющиеся оружием морских моллюсков-конусов. Местные анестетики, такие как новокаин и лидокаин, тоже являются блокаторами ПЧНК: их местное применение приводит к блокаде чувствительных нейронов.

Но не все токсины блокируют канал: есть и такие, которые его активируют, то есть увеличивают время, когда канал находится в открытом состоянии. Примером таких молекул является батрахотоксин, содержащийся в секрете кожных желез некоторых Южноамериканских лягушек-листолазов. Распространенные инсектициды пиретроиды также относятся к активаторам ПЧНК.

$\alpha$ - и  $\beta$ -токсины из яда скорпионов представляют собой небольшие белки (~60—65 аминокислотных остатков), в структуре которых присутствует  $\beta$ -лист из трех тяжей и короткая  $\alpha$ -спираль, скрепленные четырьмя дисульфидными связями (*рис.4 цветной вкладки*). Хотя и те, и другие токсины, по сути, активируют канал, делают они это по-разному.  $\alpha$ -Токсины мешают каналу закрыться, а  $\beta$ -токсины – помогают ему открыться. Соответственно и места взаимодействия с ПЧНК у этих токсинов разные: те и другие связываются с ПЧД, но для  $\alpha$ -токсинов это ПЧД-IV, а для  $\beta$ -токсинов – ПЧД-II.

Остановимся теперь подробнее на  $\alpha$ -токсинах и их «взаимоотношениях» с ПЧНК. Дело в том, что в яде скорпионов присутствуют молекулы, обладающие токсическим действием по отношению к насекомым или млекопитающим (назовем соответствующие  $\alpha$ -токсины инсектотоксинами и млекопитоксинами). И те, и другие связываются с ПЧД-IV, но только у разных каналов. У насекомых это свой канал, называемый Paга [18], а у млекопитающих есть целых девять разновидностей каналов, обозначаемых Nav 1,1–1,9

[19]. Разные ПЧНК млекопитающих выполняют разные функции. Например, Nav1,2 характерен для центральной нервной системы, Nav 1,4 – для скелетной мускулатуры, Nav 1,5 – для сердца [20]. А дальше в ход идет упомянутая «комбинаторная библиотека» яда скорпионов, в которой может найтись молекула, активная по отношению к выбранной мишени. Если это происходит, «владелец» такого яда получает эволюционное преимущество по сравнению с другими, и та часть его генома, которая отвечает за состав ядовитой библиотеки, широко распространяется в будущих поколениях скорпионов.

Присутствующие в яде скорпионов нейротоксины отличаются разнообразием: некоторые из них могут быть направлены исключительно на каналы насекомых (инсектотоксины), тогда как другие действуют на каналы млекопитающих (млекотоксины). Есть также молекулы, действующие сразу и на те, и на другие ПЧНК. Что лежит в основе молекулярной эволюции этих токсинов, позволяющей им угнаться сразу за множеством ускользающих мишеней? Попробуем ответить на этот вопрос.

### **Компьютерный анализ выявляет «молекулярную гонку вооружений»**

В Институте биоорганической химии им. академиков М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН было проведено исследование, направленное на выявление особенностей млеко- и инсектотоксинов из яда скорпионов, определяющих их селективное взаимодействие с соответствующими ПЧНК. Работа состояла из двух частей:

1. Компьютерный анализ структуры и динамики позволил выявить характерные особенности млеко- и инсектотоксинов и предсказать активность «сиротского» токсина с неизвестной селективностью. Эта часть работы была сделана в лаборатории моделирования биомолекулярных систем.

2. Затем предсказания были проверены в лаборатории нейрорецепторов и нейрорегуляторов: был синтезирован «сиротский» токсин и исследована его специфичность.

Компьютерное моделирование было основано на методе молекулярной динамики (МД) [24]. Установлено, что молекулы  $\alpha$ -токсинов, несмотря на свой небольшой размер и жесткую структуру, состоят из двух динамических модулей. Анализ характерных движений показал, что один из этих модулей достаточно «жесткий», а другой конформационно «пластичный». Более того, движения «пластичного» модуля различаются у млеко- и инсектотоксинов (*рис.4 цветной вкладки*). Идентифицированные с помощью МД части молекул получили название «корового модуля» и «модуля специфичности». Сердцевинный модуль  $\alpha$ -токсинов оказывается эволюционно консервативным (очень сходно устроенным у инсекто- и млекотоксинов), а модуль специфичности – переменным, соответствующим конкретной мишени действия. Сердцевинный модуль, таким образом, отвечает за распознавание ПЧНК «вообще», а быстро изменяющийся в эволюции модуль специфичности позволяет токсину «настраиваться» на конкретный тип канала.

Было также обнаружено, что модуль специфичности млекотоксинов существенно более гидрофильный, чем у инсектотоксинов. Эта особенность пред-

положительно отражает структурные детерминанты, позволяющие токсинам селективно распознавать свои мишени. Что интересно, анализ свойств ПЧНК показал ту же тенденцию для внеклеточной части S5–S6 повтора I: у каналов млекопитающих эти области более гидрофильны, а у инсектотоксинов – гидрофобны. Сопоставление результатов анализа с накопленными биохимическими данными позволило предложить любопытный характер связывания  $\alpha$ -токсинов с ПЧНК. Коровый домен, по-видимому, взаимодействует с ПЧД-IV, в то время как модуль специфичности связывается с петлей S5–S6 повтора I. Интересно, что данные области в структуре ПЧНК сближены, что также было показано в независимых экспериментах. Идея соответствия модульной организации токсинов доменной структуре каналов имеет интересный эволюционный смысл, позволяющий нам разглядеть гонку вооружений в противостоянии ядовитых животных и их жертв. Модульная структура предположительно позволяет токсинам гибко адаптироваться к изменяющейся мишени.

Компьютерный анализ может быть использован для предсказания активности токсинов с неизученными свойствами. В частности, для токсина M9 из яда Среднеазиатского скорпиона *Mesobuthus eupeus*, ставшего первым нейротоксином из скорпионьего яда, для которого была установлена пространственная структура (кстати, это тоже было сделано в ИБХ [25]), была предсказана активность в отношении каналов как млекопитающих, так и насекомых. Биоинженерный синтез и тестирование активности этого токсина на рекомбинантных ПЧНК подтвердили высказанное предположение. Результаты представленной работы были опубликованы в журнале *Journal of Bio-logical Chemistry* [26]. Эволюционное обособление модулей  $\alpha$ -токсинов, похоже, вызвано требованиями гонки вооружений – необходимостью оперативно адаптироваться вслед за изменяющимися условиями среды: появлением новых мишеней и изменением старых. Вряд ли этот подход является универсальным, но в данном случае он позволил с новой стороны взглянуть на взаимосвязь структура—функция для биологически активных пептидов.

## Биоинженерия и нейробиология

Исследования молекулярных основ эволюционной гонки вооружений имеют не только фундаментальное значение. Например, заново созданные «дизайнерские» молекулы – аналоги нейротоксинов с заданной исследователями активностью – являются идеальными инструментами исследования нервной системы. Такие молекулы позволили бы прицельно регулировать работу ионных каналов и модифицировать нервный ответ желаемым образом.

Придание нейротоксинам желаемой селективности и видоспецифичности позволит, например, создать инсектицид нового поколения. Биоинженерно изготовленный или даже внедренный в геном растений инсектотоксин позволит эффективно бороться с насекомыми-вредителями. А можно представить себе возможность создания идеально селективного инсектотоксина, действующего на вредителей и не токсичного для полезных насекомых (например, пчел).

Наконец, идеально селективные нейротоксины – уже не яды, а точно настраиваемые нейрорегуляторы – нашли бы применение в молекулярной медицине для лечения заболеваний, связанных с дисфункцией ионных каналов и называ-

емых каналопатиями. Среди них – различные неврологические и психические расстройства, а также к патологии скелетной и сердечной мускулатуры [27].

## Литература

1. Докинз Р. Самое грандиозное шоу на Земле. Доказательства эволюции. — М.: Кор-пус/Астрель, 2012.
2. биомолекула: «Когда б вы знали, из какого сора...».
3. биомолекула: «Возможна ли жизнь без гемоглобина?».
4. Andersson S.G. (2006). The bacterial world gets smaller. *Science* 314, 259–260.
5. биомолекула: «Семья — женское изобретение».
6. Марков А. Эволюция человека. В 2-х томах. — М.: Династия, 2011.
7. Элементы: «Гонка вооружений — двигатель эволюции».
8. Элементы: «Современные паразиты опаснее прошлых и будущих».
9. Gassmann W., Bhattacharjee S. (2012). Effector-triggered immunity signaling: from gene-for-gene pathways to protein-protein interaction networks. *Mol. Plant Microbe Interact.* 25, 862–868.
10. биомолекула: «Иммунологическая Нобелевская премия (2011)».
11. биомолекула: «Толл-подобные рецепторы: от революционной идеи Чарльза Дрейнуэя до Нобелевской премии 2011 года».
12. биомолекула: «Гонки с вирусом: эпидемиология и экология вируса гриппа».
13. van der Woude M.W., Bäuml A.J. (2004). Phase and antigenic variation in bacteria. *Clin. Micro-biol. Rev.* 17, 581–561.
14. биомолекула: «Великому комбинатору и не снилось: комбинаторика токсинов пауков».
15. биомолекула: «Формирование мембранного потенциала покоя».
16. Yu F.H., Catterall W.A. (2003). Overview of the voltage-gated sodium channel family. *Genome Biol.* 4, 207.
17. Soong T.W., Venkatesh B. (2006). Adaptive evolution of tetrodotoxin resistance in animals. *Trends Genet.* 22, 621–626.
18. Dong K. (2007). Insect sodium channels and insecticide resistance. *Invert. Neurosci.* 7, 17–30.
19. Lopreato G.F., Lu Y., Southwell A., Atkinson N.S., Hillis D.M., Wilcox T.P., Zakon H.H. (2001). Evolution and divergence of sodium channel genes in vertebrates. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 98, 7588–7592.
20. Catterall W.A., Goldin A.L., Waxman S.G. (2005). International Union of Pharmacology. XLVII. Nomenclature and structure-function relationships of voltage-gated sodium channels. *Pharma-col. Rev.* 57, 397–409.
21. Catterall W.A. (2010). Ion channel voltage sensors: structure, function, and pathophysiology. *Neuron* 67, 915–928.
22. биомолекула: «О чем не знал Гальвани: пространственная структура натриевого канала»;
23. биомолекула: «Калиевый канал in silico»;
24. биомолекула: «Молекулярная динамика биомолекул. Часть I. История полувековой давности».

25. Pashkov V.S., Maiorov V.N., Bystrov V.F., Hoang A.N., Volkova T.M., Grishin E.V. (1988). Solution spatial structure of 'long' neurotoxin M9 from the scorpion *Buthus eupeus* by 1H-NMR spectroscopy. *Biophys Chem.* 31, 121–131.

26. Chugunov A.O., Koromyslova A.D., Berkut A.A., Peigneur S., Tytgat J., Polyansky A.A., Pentkovsky V.M., Vassilevski A.A., Grishin E.V., Efremov R.G. (2013). Modular Organization of  $\alpha$ -Toxins from Scorpion Venom Mirrors Domain Structure of Their Targets — Sodium Channels. *J. Biol. Chem.* doi: 10.1074/jbc.M112.431650.

27. Andavan G.S., Lemmens-Gruber R. (2011). Voltage-gated sodium channels: mutations, channelopathies and targets. *Curr. Med. Chem.* 18, 377–397.

# Ошибки природы: «волчья пасть» и «заячья губа» побеждены?

И.Г. Удина, О.Л. Курбатова, Ю.А. Васильев, А.С. Прудникова,  
А.Ф. Верапатвелян, О.В. Гуленко

**Ирина Геннадьевна Удина,**  
*руководитель группы популяционной иммуногенетики, ведущий научный сотрудник, доктор биологических наук, доцент по специальности «генетика»),*

**О.Л. Курбатова,**  
*руководитель группы демографической генетики, ведущий научный сотрудник, кандидат биологических наук, доцент по специальности «генетика»),*

**Ю.А. Васильев**  
*ассистент кафедры детской стоматологии, ортодонтии и челюстно-лицевой хирургии,*

**А.С. Прудникова**  
*кандидат биологических наук*

**А.Ф. Верапатвелян**  
*доцент кафедры детской стоматологии, ортодонтии и челюстно-лицевой хирургии, к.м.н.,*

**О.В. Гуленко**  
*доцент, стоматолог, кандидат медицинских наук*  
*Проект РФФИ № 13-03-11521*

*«Красота спасет мир...»  
Ф..М..Достоевский*

## Введение

Рождение здорового ребенка – это чудо, которого ожидает семья будущего малыша. В голову даже не может прийти мысль о том, что родившийся маленький человек может быть болен. Когда рождается ребенок, мы уже его любим и хотим защитить от всех напастей и болезней.

Если у малыша врожденный порок развития, то в разные времена к этому относились люди по-разному. Называли это и проделками демонических сил, и карой богов за прегрешения, а в Древней Руси считали таких детей с «особенной отметиной» свыше. В любом случае, рождение такого ребенка – тяжелое испытание для родителей и самого малыша – им предстоит сложный путь борьбы с пороком и, в случае победы, – его выздоровление...

Врожденные пороки развития – это ошибки природы, возникающие при внутриутробном развитии организма. Врожденные пороки развития

челюстно-лицевой области (ВПР ЧЛЮ) – «заячья губа» (расщелина верхней губы) и «волчья пасть» (расщелина неба) – одни из наиболее широко распространенных тяжелых патологий плода, известные с древнейших времен, в формировании которых участвуют генетические и средовые факторы. Улыбка здорового малыша – награда и радость семье, а для больного малыша красивая улыбка – результат усилий врачей, которые в результате хирургических и пластических операций достигают победы над врожденным пороком.

С древних времен люди научились исправлять «заячью губу», самые ранние операции относятся к III–VI вв. до нашей эры. В Китае и Индии уже делали такие операции. В древнеиндийской книге «Аюрведы» в 16 главе описаны подобные операции. Уже Гиппократ писал о необходимости операций для лечения таких больных.

Когда рождается малыш с врожденной расщелиной, родители задаются вопросом: «Почему?» или «За что?». А как нам расценивать подобные события: что это – плата за красоту остальных? Отчасти событие сравнимо с внезапно упавшим на голову кирпичом, но лишь фигурально. На самом деле такие малыши рождаются по всему миру. Где-то чаще, где-то реже, но неизменно...

Частота расщелин губы и /или неба варьирует в зависимости от географического региона проживания, расовой и этнической принадлежности.

В азиатских популяциях и популяциях американских индейцев отмечена максимально высокая частота встречаемости рассматриваемых врожденных пороков развития челюстно-лицевой области (ВПР ЧЛЮ) (1/500); популяции, европейские по происхождению, характеризуются промежуточной частотой (1/1000), а популяции, имеющие африканское происхождение, – минимальной частотой (1/2500).

Частоту этих пороков предопределяет наследственность, а также вредные воздействия на развивающийся организм в период формирования челюстно-лицевого аппарата в районе 2 месяцев беременности посредством воздействия на организм матери. К вредным воздействиям следует отнести курение матери в первом триместре беременности, прием наркотических веществ, включая некоторые лекарственные препараты, например, анальгетики, облучение и алкоголизм. Сюда же следует отнести профессиональные вредности родителей, под которые попадают профессии дворников, уборщиц, сельскохозяйственных рабочих, для которых отмечен постоянный контакт с химикатами, например, с пестицидами или детергентами. Выявлено влияние загрязнения окружающей среды, например, тяжелыми металлами: кадмием и свинцом. Кадмий накапливается в организме курильщиков или членов их семей. Свинцовое загрязнение часто обусловлено интенсивным автомобильным движением, например, вблизи автомобильных трасс или городских улиц с интенсивным движением. Важную роль играют вирусные инфекции, которые имеют тератогенный эффект, т.е., вызывают различные уродства, например, печально известный цитомегаловирус. Различные стрессы и физические травмы матери также влияют на нормальное развитие плода и могут приводить к возникновению ВПР ЧЛЮ.

Для Краснодарского края выявлена частота расщелин губы и/или неба, составившая 1,15 на 1000 новорожденных. Если в прошлом против этих ВПР дей-

ствовал довольно сильный естественный отбор, то в настоящее время, вследствие прогресса медицины и появления эффективных методов хирургической коррекции дефектов в раннем возрасте, происходит ослабление действия отбора против них. Дети с врожденными расщелинами губы и неба не только выживают, но и в будущем имеют равные с другими лицами шансы вступить в брак и иметь потомков, которым они передают свои гены, что может привести к постепенному накоплению в популяциях мутаций, обуславливающих развитие этих врожденных пороков развития. Однако дети с ВПР ЧЛЮ все же ослаблены, смертность их до года высокая: каждый шестой ребенок раньше погибал до 1 года. Сейчас эта статистика улучшается, особенно в развитых странах с хорошим уровнем медицинского обслуживания населения. Требуется огромная любовь родителей и усилия врачей, чтобы выводить малыша. Ему труднее есть – нужны соски специальной формы, чтобы при расщелине неба пища не попадала в носовую полость. Все это необходимо до проведения корректирующей операции. Иногда нужна не одна операция, а несколько последовательных, но в итоге – красивая улыбка счастливого ребенка. Нужны усилия и других специалистов, например, логопеда.

Понятно, что в небольших по численности изолированных популяциях могли бы накапливаться варианты генов, которые участвуют в формировании рассматриваемых ВПР ЧЛЮ. Для Краснодарского края, население которого представлено представителями многих национальностей (русских, украинцев, армян, грузин, адыгейцев, греков, представителей многочисленных народов Дагестана (лаков, лезгин и пр.), чеченцев и многих других вряд ли следует ожидать влияние инбридинга или близкородственных браков, что могло бы быть в аулах Дагестана, где жители аула могут быть потомками одного прародителя, да и сохранилась традиция, разрешающая браки между родственниками.

Выявление соотношений вклада отдельных факторов в этиологии ВПР ЧЛЮ необходимо для оценки и прогнозирования риска рождения детей с такими дефектами для популяций и отдельных семей, для разработки профилактических мер, направленных на снижение частоты ВПР.

Нами предпринято комплексное изучение ВПР ЧЛЮ в населении Краснодарского края, включающее анализ роста и веса детей с ВПР ЧЛЮ при рождении, анализ брачной структуры родителей детей с ВПР ЧЛЮ, возраста матери при рождении ребенка, а также генетических маркеров (группы крови систем АВО и Rhesus) и ДНК-маркеров. Цель данного исследования – выявить совокупность молекулярных, генетико-демографических и антропометрических характеристик, ассоциированных с ВПР ЧЛЮ в населении Краснодарского края.

Сведения о детях с ВПР ЧЛЮ (расщелины губы и/или неба) и их матерях получены из диспансерной компьютерной базы данных, созданной на кафедре детской стоматологии, ортодонтии и челюстно-лицевой хирургии ГОУ ВПО КГМУ. Проведено анкетирование семей с детьми с ВПР ЧЛЮ, которое включало сбор генетико-демографических данных о пациенте, его родителях и других предках (дата и место рождения, место жительства, национальная принадлежность), а также данные о профессии родителей, их вредных привычках (курение, наркомания и алкоголизм) и вредных условиях работы.

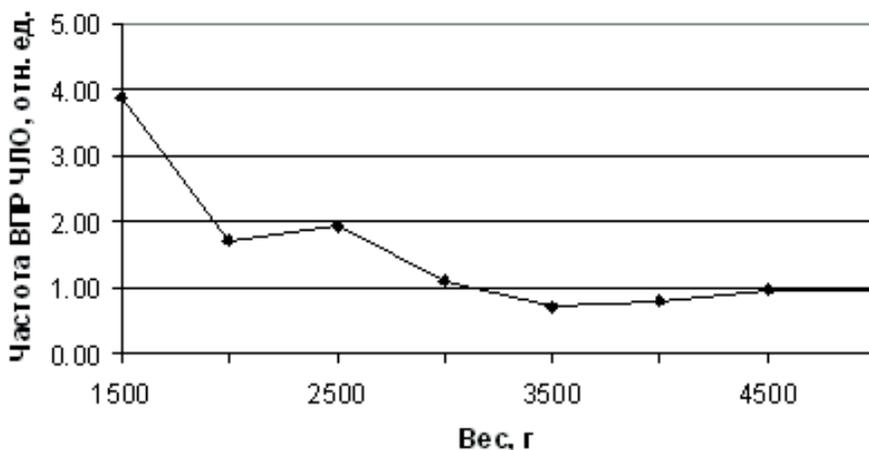
Нами изучен возраст матери при рождении больного ребенка и структура браков в предшествующих поколениях.

Распределение групп крови систем АВО и Rhesus и морфофизиологические признаки (вес, рост при рождении) изучены по данным медицинских карт детей с ВПР ЧЛО. Предпосылкой для данного исследования в Краснодарском крае явилось то обстоятельство, что в ГОУ ВПО КГМУ ведется многолетний мониторинг ВПР ЧЛО и накоплен большой клинический опыт по их коррекции.

Предпринятое исследование аналогично подъему по лестнице, устремленной вверх, конца которой не видно. Итак, ступаем на первую ступеньку.

Антропометрические признаки. Среди детей с ВПР ЧЛО доля недоношенных, по сравнению с контрольной группой, выше почти в 7 раз. Оказалось, что группа детей с ВПР ЧЛО отличается от контрольной группы более низкими средними значениями длины тела и веса при рождении, более высокими значениями дисперсии обоих признаков и меньшей долей детей со средними значениями признаков. Большая доля недоношенных и детей с низкими весоростовыми показателями при рождении среди пациентов с ВПР ЧЛО свидетельствует о действии стабилизирующего отбора, охраняющего популяционную норму. На *рис. 1* представлена зависимость относительной частоты ВПР ЧЛО от веса ребенка при рождении, демонстрирующая увеличение риска ВПР ЧЛО для детей с низким весом.

### Связь между частотой ВПР ЧЛО и весом при рождении



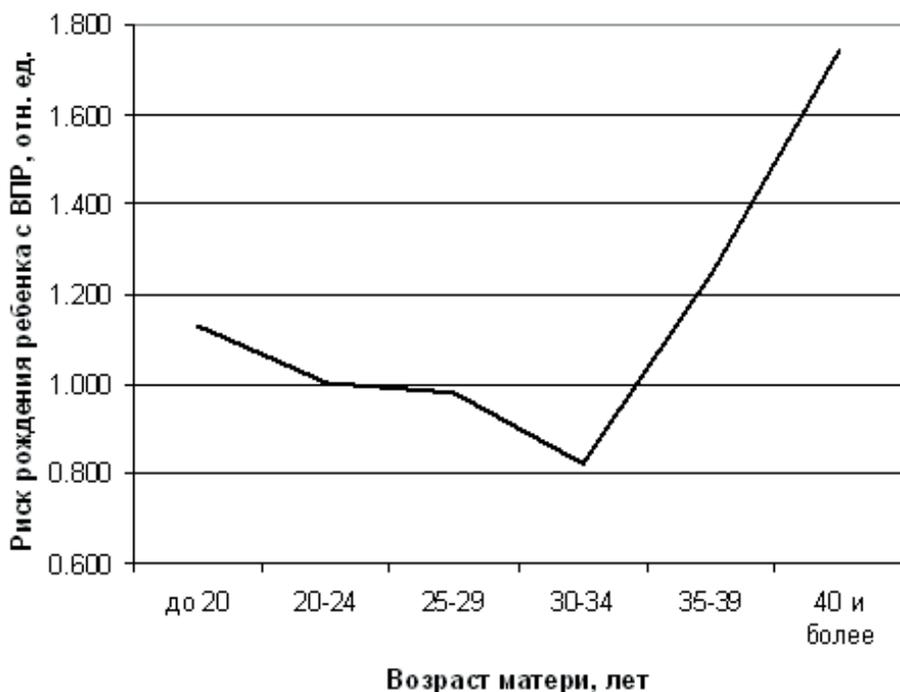
**Рис. 1** Зависимость относительной частоты ВПР ЧЛО от веса ребенка при рождении

В некоторых исследованиях отмечен более низкий вес и рост при рождении для детей с ВПР ЧЛО при неизменном проценте недоношенных по сравнению с контролем, что подтверждает факт действия стабилизирующего отбора, охраняющего популяционную норму.

Современная медицина располагает большими возможностями по реабилитации недоношенных детей и снижению их смертности и, таким образом, ослабляет интенсивность естественного отбора против детей с ВПР ЧЛО с малым весом и ростом (с ослабленной жизнеспособностью). Впоследствии это может приводить к накоплению в популяции мутаций, вовлеченных в формирование ВПР ЧЛО и к возрастанию частоты данных ВПР в последующих поколениях. Что нам покажет следующая ступенька?

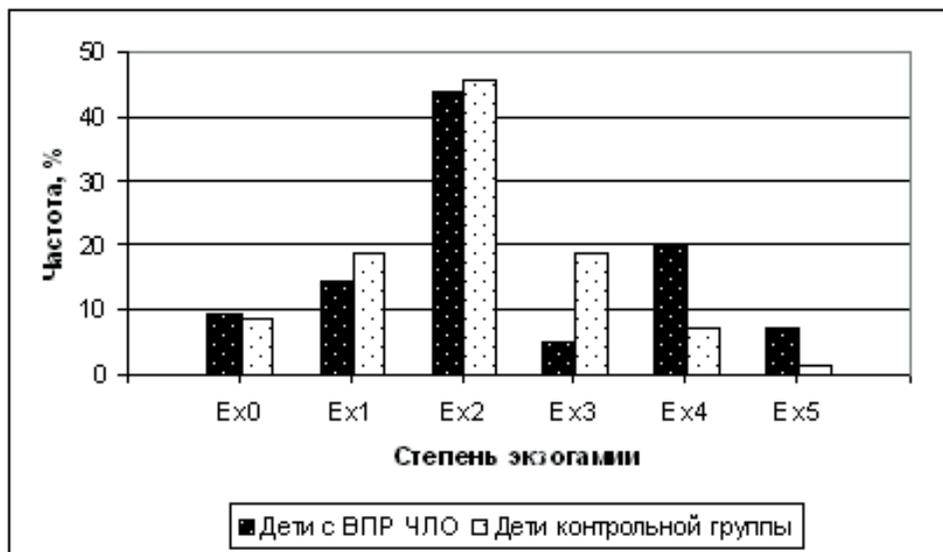
### Возраст матери при рождении ребенка

Анализ возрастного распределения матерей, родивших детей с ВПР ЧЛО в период с 1978 по 2009 гг. ( $N = 999$ ) в Краснодарском крае показал, что средний возраст матери детей с ВПР ЧЛО больше! На *рис. 2* возрастное распределение матерей больных детей, родившихся в период с 2002 по 2009 г., было разделено на возрастное распределение матерей в Краснодарском крае по официальным статистическим данным за аналогичные годы.



**Рис. 2** Зависимость риска рождения ребенка с ВПР ЧЛО от возраста матери

Очевидно, что риск рождения ребенка с ВПР возрастает для матерей старше 35 лет, особенно значительно – для матерей старше 40 лет; небольшое увеличение риска отмечается и для очень молодых матерей (моложе 20 лет). По данным демографической статистики, в Краснодарском крае наблюдается увеличение среднего возраста матерей, т.е. их «постарение»,



**Рис. 3** Уровень экзогамии в семьях с детьми с ВПР ЧЛО и в контроле

которое составило за период с 2001 по 2008 гг. ровно год. При сохранении такой тенденции можно ожидать некоторого роста частоты рождения детей с данной патологией. По всему миру также отмечено увеличение риска с возрастом матери, наиболее выраженное после 40 лет, лишь в отдельных исследованиях показано увеличение риска рождения ребенка с ВПР ЧЛО для очень молодых матерей. Таким образом, наши данные находятся в хорошем соответствии с другими исследованиями. Самое главное – на этой ступеньке мы видим, что возможна профилактика пороков! Надо только разъяснить, что позднее рождение детей более рискованно в отношении рождения ребенка с ВПР ЧЛО. Поднимаемся на следующую ступеньку бесконечной лестницы.

### Брачная структура

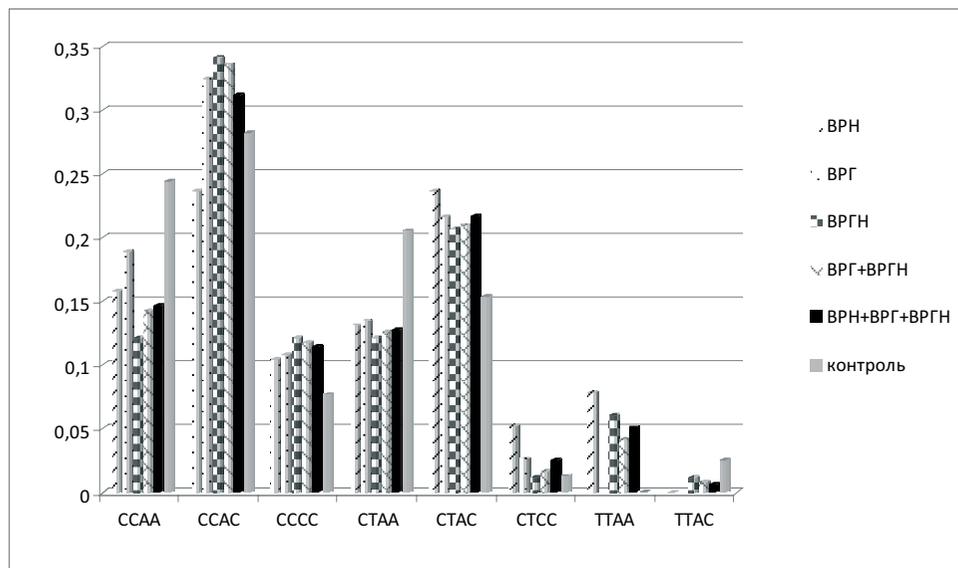
Мы изучили с помощью анкетирования генеалогию наших маленьких пациентов – от каких браков чаще рождаются дети с ВПР ЧЛО? В соответствии с генеалогическими данными анкет семьи были распределены по степени экзогамии на 6 категорий, начиная с минимальной (все предки происходят из одной области), заканчивая максимальной (в родословной встречаются предки более двух национальностей). Для детей русской национальности (этническая идентификация сделана со слов родителей) различие распределений

между группами больных и здоровых статистически достоверно: степень экзогамии в семьях больных детей в среднем выше, чем в семьях здоровых.

Это свидетельствует о малой вероятности эффектов инбридинга в этиологии ВПР ЧЛО в русских семьях Краснодарского края. Почти у трети (32%) «русских» детей с ВПР ЧЛО в родословной встречаются предки разных национальностей (в контроле таких семей 27%). Доля семей с уровнем экзогамии выше 3 в группе больных – 27,4%, в контроле – 8,6%. Соответственно, можно прогнозировать более высокий уровень генетического разнообразия в группе больных детей. Полученные результаты позволяют предположить, что у детей с ВПР ЧЛО в Краснодарском крае могут быть выявлены разнообразные мутации генов, вовлеченных в развитие расщелин губы и неба, которые распространены в разных этнических группах России и сопредельных стран, что соответствует факту проживания представителей широкого спектра национальностей в Краснодарском крае. Теперь мы добрались до четвертой ступеньки исследования – что же там?

### Группы крови

У детей с ВПР ЧЛО более высокая частота группы крови O(I) и более низкая частота группы A(II), по сравнению с контролем (соотношение частот группы крови A(II) к O(I) у больных – 0,59 и у здоровых – 1,75). По системе Rhesus не выявлено достоверных различий между детьми с ВПР и здоровыми. Таким образом, у детей с O(I) группой крови выше риск ВПР ЧЛО почти в 3 раза, по сравнению с детьми с группой A(II). Для других врожденных пороков и детских заболеваний также часто наблюдали более высокую частоту



**Рис.4** Распределение детей с ВПР ЧЛО и контроля по частоте генотипов изученных полиморфизмов гена MTHFR.

групп крови O(I). Возможно, дети с первой группой крови более чувствительны к различного рода воздействиям, включая этапы внутриутробного развития плода. Ну, поднимаемся на пятую ступеньку...

## ДНК-маркеры

В мире проводят многочисленные исследования для установления генетических и средовых факторов, обуславливающих ВПР ЧЛО: анализ эпидемиологических данных; ассоциативные исследования в семейном анализе, включая полногеномные (в Европе и мире (и установили более 12 областей генома, которые связаны с развитием ВПР ЧЛО! А вероятных важных генов более 1300!!!)), по взаимодействию генотипа и особенностей обмена веществ (в частности, фолиевой кислоты) или факторов «образа жизни». Установлены ассоциации полиморфных вариантов гена MTHFR с развитием изолированных расщелин губы и неба. Ген MTHFR (1p36.3) кодирует 5,10-метилентетрагидрофолатредуктазу – ключевой фермент фолатного обмена, который переводит фолиевую кислоту в ее активную форму 5-метилтетрагидрофолат, молекула которого несет метильную группу, необходимую для реметилирования гомоцистеина. Важная функция гена MTHFR обуславливает его ассоциации с широким спектром заболеваний, включая сердечно-сосудистые, глаукому и пр.

Наиболее широко распространены два SNP (полиморфизма) гена MTHFR: C677T в экзоне 4 и A1298C в экзоне 7. Мутация C677T вызывает замену аланина на валин (p.Ala222Val) в каталитическом домене белка-фермента. У гомозигот по мутантному аллелю активность фермента *in vitro* снижена на 70%, а у гетерозигот – на 35%. Замена A1298C приводит к замене глутаминовой кислоты на аланин в регуляторном домене фермента (p.Glu429Ala). Присутствие аллеля 1298C снижает активность фермента MTHFR в меньшей степени, чем мутация C677T. Есть данные, что генотип MTHFR 677 T/T в сочетании с низким уровнем фолата в организме может выступать как фактор риска развития состояний, связанных со снижением метилирования ДНК, например, различных неопластических процессов, например, различных опухолей мозга у детей. В то же время генотип MTHFR 1298 C/C влияет на процессы метилирования ДНК независимо от уровня фолата в организме.

Полученные нами результаты подтверждают, что изученные генетические маркеры вовлечены в формирование ВПР ЧЛО. Мы показали, что матери с генотипом MTHFR 677 T/T (т.е. гомозиготные по мутантному аллелю) в четыре раза чаще могут родить ребенка с ВПР ЧЛО! А – с MTHFR 1298 C/C (т.е. гомозиготные по мутантному аллелю) в 3 раза чаще! В контроле в два раза чаще встречается генотип CCAA (без мутантных аллелей), чем в группе детей с врожденной расщелиной неба (*рис.1 цветной вкладки*).

Это распределение частот генотипов находится в хорошем соответствии с данными, свидетельствующими о снижении активности фермента MTHFR у двойных гетерозигот по этим SNP на 40–50%. Немного о профилактике – по данным зарубежных ученых, богатая овощами диета и обязательный прием мультивитаминов (включающих фолиевую кислоту) сни-

жает риск рождения ВПР ЧЛЮ. Прыгаем на шестую ступеньку – все выше и выше – интересно, что же там?

### Соотношение диагнозов и их динамика

В прошлом году 24–26 октября состоялась IV Всероссийская научно-практическая конференция «Врожденная и наследственная патология головы лица и шеи у детей: актуальные вопросы комплексного лечения» на базе ГБОУ ВПО «Московский Государственного Медико-стоматологического Университета имени А.И.Евдокимова, на которую съезжаются ведущие специалисты – челюстно-лицевые хирурги, которые исправляют ошибки природы и корректируют ВПР ЧЛЮ, включая врожденные расщелины верхней губы и неба. Все чаще с трибуны и в кулуарах звучали слова, что детей с ВПР ЧЛЮ стало больше в последнее время, а по мнению отдельных специалистов, большее распространение получила более тяжелая патология – врожденная расщелина неба, изолированная и в сочетании с расщелиной губы. Так ли это в Краснодарском крае? Нами рассмотрена динамика частоты рождения детей с врожденными изолированными расщелинами губы и/или неба (ВРГ, ВРН и ВРГН) в Краснодарском крае на основе данных диспансерной базы кафедры детской стоматологии, ортодонтии и челюстно-лицевой хирургии КГМУ за период с 1985 по 2009 гг. (N=1745), и установлена частота этих пороков для отдельных районов. Средняя частота в крае составляет 1,15:1000 и остается относительно стабильной в течение всего периода наблюдений. Выявлено варьирование частоты рождения детей с расщелинами губы и/или неба по административно-территориальным единицам края от 1:2000 до 1:500 (т.е. различия 4-х кратные!) (*рис.1 цветной вкладки*). Такие различия предполагают существенную роль факторов загрязнения окружающей среды. Нами показана корреляция выявленных частот ВПР ЧЛЮ с интегральными показателями загрязнения отдельных районов.

За 25-летний период отдельно для мальчиков и девочек были значительные колебания в соотношении диагнозов по годам, однако при объединении их в общую выборку колебания значительно нивелировались (*рис.4 цветной вкладки*). Так что в Краснодарском крае динамика соотношения диагнозов в суммарной группе детей относительно стабильна на протяжении 25-летнего периода.

### Послесловие

Вот мы и поднялись по лестнице познания на шесть ступенек. Много ли еще ступенек впереди? Да, впереди еще много ступеней у нашей лестницы познания, но мы по ней уже идем.

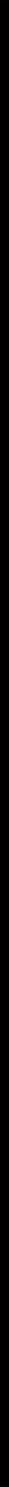
### Литература

1. Алтухов Ю.П., Курбатова О.Л. Проблема адаптивной нормы в популяциях человека // Генетика. 1990. – Т. 26, N 4. С. 583–598.
2. Курбатова О.Л., Васильев Ю.А., Прудникова А.С. и др. Изменчивость морфофизиологических и генетико-демографических признаков в группе детей с врожденными расщелинами губы и неба // Генетика. – 2011. – Т. 47, №

11. – 1514–1522. (Поддержана грантами РФФИ 09-04-96600-р\_юг\_а и 11-04-96573-р\_юг\_ц).
3. Курбатова О.Л., Победоносцева Е.Ю. Урбанизированные популяции// Динамика популяционных генофондов при антропогенных воздействиях/ Под ред. Ю.П. Алтухова. М.: Наука. – 2004. – С. 433–516.
4. Курбатова О.Л., Победоносцева Е.Ю. Загрязнение окружающей среды и проблема генетической безопасности населения мегаполиса // Наука и технологии в промышленности. – 2010. – №1. – С. 79–86.
5. Панкова Е.Е., Матулевич С.А., Голубцов В.И. Мониторинг врожденных пороков развития в Краснодарском крае // Кубанский научный медицинский вестник. – 2009. – №1. – С. 79–82.
6. Удина И.Г., Васильев Ю.А., Учаева В.С., Текуцкая Е.Е., Победоносцева Е.Ю., Прудникова А.С., Быкова Н.И., Брещенко Е.Е., Верапатвелян А.Ф., Курбатова О.Л. Применение генетико-демографических подходов к оценке риска рождения детей с расщелинами губы и неба в Краснодарском крае // Наука Кубани. – 2011. – №3. – С. 35–43. (Поддержана грантом РФФИ 09-04-96600-р\_юг\_а).
7. Удина И.Г., Учаева В.С., Васильев Ю.А., Бутовская П.Р., Верапатвелян А.Ф., Плотникова Е.Ю., Курбатова О.Л., Гуленко О.В. Молекулярно-генетическое изучение врождённых пороков развития челюстно-лицевой области в Краснодарском крае// Наука Кубани. – 2011. – №4. – С. 20–27. (Поддержана грантом РФФИ 11-04-96573-р\_юг\_ц).
8. Удина И.Г., Васильев Ю.А., Победоносцева Е.Ю., Прудникова А.С., Верапатвелян А.Ф., Гуленко О.В., Курбатова О.Л. Пространственно-временная динамика частот расщелин губы и/или неба в Краснодарском крае // Кубанский научный медицинский вестник. – 2013. – №1. – С. 171–175. (Поддержана грантом РФФИ 11-04-96573-р\_юг\_ц).
6. Фогель Ф., Мотульски А. Генетика человека. Проблемы и подходы. Т.3. / Под ред. Ю.П. Алтухова, В.М. Гиндилиса. М.: Мир. – 1990. – С. 177–180.
7. Шульженко В.И., Верапатвелян А.Ф., Плечова Е.А. и др. Статистический анализ врожденной патологии лица у детей Краснодарского края // Кубанский научный медицинский вестник. – 2006. – № 5–6 (86–87). – С. 122–123.
8. Шульженко В.И., Васильев Ю.А., Курбатова О.Л., Холод О.Н., Победоносцева Е.Ю., Учаева В.С., Верапатвелян А.Ф., Удина И.Г. Разработка подходов к оценке генетических факторов риска рождения детей с врождёнными пороками развития челюстно-лицевой области в Краснодарском крае // Кубанский научный медицинский вестник. – 2010. – №2 (116). – С. 107–111. (Поддержана грантом РФФИ 09-04-96600-р\_юг\_а).
9. Corre A.P., Herkrath Q., Herkrath F.J., Rebelo M.A.B, Vettore M. V. Parental age as a risk factor for non-syndromic oral clefts:A meta-analysis // J. Dentistry. – 2012. – V.40. – P. 3–14.
10. Dixon M.J., Marazita M.L., Beaty T.H., Murray J.C. Cleft lip and palate: synthesizing genetic and environmental influences// Nat. Rev. Genet. – 2011. – V. 12 (3). – P. 167–178.
11. Isotalo P.A, Sotalo P.A., Wells G.A., Donnelly J.G. Neonatal and Fetal Methylenetetrahydrofolate Reductase Genetic Polymorphisms: An Examination

of C677T and A1298C Mutations// Am. J. Hum. Genet. – 2000. – V.67(4). – P. 986–990.

12. *Wyszynski D.F., Sarkozi A., Vargha P., Czeizel A.E.* Birth weight and gestational age of newborns with cleft lip with or without cleft palate and with isolated cleft palate // J Clin Pediatr Dent. – 2003 – V. 27(2). – P. 185–190.



**НАУКИ О ЗЕМЛЕ**

# Минералы как матрицы генетической информации: проверка гипотезы

С.В.Кривичев

*Сергей Владимирович Кривовичев, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой кристаллографии геологического факультета Санкт-Петербургского государственного университета. Лауреат Премии Президента РФ в области науки и инноваций для молодых ученых 2008 г. Ведущий редактор журнала European Journal of Mineralogy. Вице-президент Международной Минералогической Ассоциации. Автор более 400 печатных трудов в области минералогии, кристаллографии, неорганической кристаллохимии и радиохимии.*

*Кафедра кристаллографии, геологический факультет, Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская наб., 7/9, 199034 Санкт-Петербург Проект РФФИ № 13-05-11500*

Несмотря на серьезный прогресс в области молекулярной биологии и генетики, проблема происхождения жизни остается одной из центральных для современного естествознания. Как произошла жизнь? Где и при каких условиях она зародилась и развилась в биосферу – и целую земную оболочку? Для того чтобы ответить на эти вопросы (если это вообще возможно – американский физик Хуберт Йоки высказал предположение, что эти проблемы относятся к числу заведомо нерешаемых [1]), необходимо понимать, как устроены живые существа и что лежит в основе жизненного процесса как такового. Биологи отвечают на эти вопросы по-разному, но все соглашаются с тем, что одной из основных особенностей жизни является способность живых организмов к обработке и передаче наследственной (генетической) информации. По словам крупнейшего биолога-эволюциониста Дж. Майнарда Смита, «..центральная идея современной биологии – это идея информации» [2]. «Биосфера представляет собой генный океан», – пишет Э.М. Галимов [3]. Как возник в живом веществе биосферы механизм передачи генетической информации от поколения к поколению?

Поскольку на момент зарождения жизни на поверхности Земли находились только неживые вещества, то есть, горные породы, состоящие из минералов, то естественно было предположить, что механизм передачи информации первоначально был «освоен» минералами. Так возникла теория генетического захвата (genetic takeover) или «гипотеза глины» (*clay hypothesis*), автором которой был шотландский химик Александр Грэхэм Кернс-Смит (*Cairns-Smith*) [4]. Согласно этой теории, кодирование и передача информации осуществлялась в глинистых минералах задолго до зарождения жизни. Глинистые минералы обладают слоистой структурой – в них протяженные слои из кремнекислородных тетраэдров  $\text{SiO}_4$  перемежаются с такими же протяженными слоями из октаэдров  $\text{MO}_6$  ( $\text{M}=\text{Mg}, \text{Al}$ ), а между слоями могут находиться катионы и молекулы воды. При удачно подобранных условиях в пространстве между слоями – межслоевое пространство – могут войти органические молекулы сколь угодно больших размеров, в том числе, молекулы, которые могли составить основу зарождающихся живых систем. Основная идея Кернс-Смита состояла в том, что глинистые минералы способны хранить и воспроизводить информацию, закодированную в дефектах их кристаллов. Реальные кристаллы всегда дефектны, и узор, образуемый дефектами на поверхности кристаллов, содержит определенную информацию. Если на пластинчатую частицу глинистого минерала нарастает новый слой, он наследует от слоя-подложки дефектный узор, а вместе с ним и соответствующую информацию. В этом состоит механизм передачи информации. При раскалывании пластинки на две, каждая из них несет реплику первичного узора дефектов – это механизм дубликации. Таким образом, кристаллы глины способны переносить, передавать и воспроизводить информацию по принципу дубликации. Органические молекулы, находящиеся в межслоевом пространстве, «переняли» эти механизмы, и таким образом возник простейший способ передачи генетической информации от одного поколения молекулярных систем к другому. Со временем этот способ все усложнялся и превратился в генетический код, существующий в настоящее время в живых организмах.

Теория генетического захвата оказалась весьма популярной и до сих пор воспроизводится в монографиях и учебных пособиях, посвященных проблеме зарождения жизни. Не обошли ее вниманием и отечественные исследователи [5, 6]. Но ведь, если эта теория верна, и минералы и вообще кристаллы способны к кодированию и переносу информации на узорах дефектов, это представляется весьма интересным с точки зрения создания новых технологий, «работающих» на молекулярном уровне. Используя кристаллы, можно было бы кодировать информацию на уровне нескольких нанометров с высокой степенью емкости. Однако ученые, занимающиеся выращиванием и получением кристаллов, прекрасно знают: при росте кристаллов дефекты образуются постоянно, и этот «дефектный» информационный шум искажает первоначальный дефектный узор и заглушает первичную информацию. Говоря языком теории информации, канал, по которому передаются данные, оказывается весьма несовершенным. Недавно этому было получено и экспериментальное подтверждение.

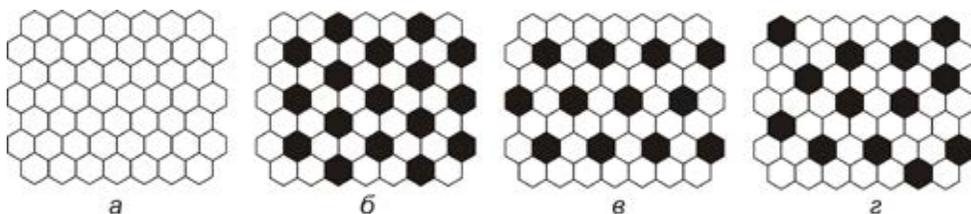
Американские ученые из Вашингтонского университета (Сиэтл) решили экспериментально проверить механизм переноса информации на кристаллических дефектах [7]. Поскольку эксперименты с глинистыми минералами весьма продолжительны и для наблюдения за ними необходимо использовать просвечивающую электронную микроскопию высокого разрешения, профессор Б. Кар (*B. Kahr*) с коллегами решили использовать более простую систему, взяв в качестве объекта исследования кристаллы кислого терефталата калия. Сначала на поверхности кристаллических пластинок исследовали рисунок распределения ямок травления, после чего пластинки раскладывали лезвием вдоль их плоскости и помещали в раствор. Там кристаллы наращивали и опять исследовали распределение ямок травления – теперь уже на наращенных кристаллах. Как оказалось, часть поверхностных дефектов передавалась по «наследству», но при этом возникало множество новых дефектов, которые практически заглушали первичную информацию. При всех оговорках авторы сделали вывод о том, что экспериментальная проверка не подтвердила гипотезу генетического захвата. В кристаллах нет механизма, обеспечивающего устойчивость передачи информации через систему поверхностных дефектов.

Однако общая идея Кернс-Смита о минералах как информационных матрицах для зарождения жизни оказалась весьма привлекательной. В 2006 г. в специализированном журнале «Происхождение жизни и эволюция биосферы» (*Origin of Life and Evolution of the Biosphere*) появилась интересная статья английских ученых Криса Гринвелла и Питера Ковини [8], в которой в качестве информационных матриц для зарождения генетического кода предлагались слоистые двойные гидроксиды. Подобно глинам, это слоистые соединения, но, в отличие от глин, они состоят только из одного типа слоев. Основу слоев составляют октаэдры  $M(OH)_6$ , в центре которых находятся катионы  $M$  ( $M=Mg, Al, Fe, Cr$  и др.), а по вершинам – гидроксильные группы  $OH$ , то есть, атомы кислорода, соединенные с атомами водорода. Октаэдры  $M(OH)_6$ , связываясь друг с другом, образуют слои. Эти слои состоят из трех субслоев – два слоя гидроксильных групп капсулируют слой катионов  $M$  (*рис.1 цветной вкладки*).

Именно поэтому эти соединения называются слоистыми двойными гидроксидами. При этом внутри каждого слоя есть разные катионы  $M$  – двух- ( $M^{2+}$ ) или трех- ( $M^{3+}$ ) валентные (например,  $Mg^{2+}$  и  $Al^{3+}$ ). Если бы внутри слоев были бы только двухвалентные катионы, то слой имел бы формулу  $M^{2+}(OH)_2$  и его суммарный заряд был бы равен нулю. Внедрение в слой катиона с положительным зарядом  $3^+$  придает всему слою дополнительный положительный заряд, который должен быть скомпенсирован. Для этого в межслоевое пространство входят отрицательно заряженные комплексы. Это могут быть моноатомные анионы: например, ионы хлора  $Cl^-$ , или полиатомные группировки: например, карбонат-анионы  $CO_3^{2-}$ ). Их наличие придает слоистым двойным гидроксидам уникальные свойства – они могут обмениваться анионами с окружающей средой. Это определяет широкое применение слоистых двойных гидроксидов в самых разнообразных областях современных технологий. Так, например, их межслоевое пространство

может быть заполнено активными органическими молекулами, и полученный композит можно использовать в качестве лекарства. В межслоевом пространстве можно осуществлять реакции между различными молекулами – в этом случае соединение выступает в роли нанореактора, и т.д. Однако идея английских ученых касается не применения слоистых двойных гидроксидов, а их возможной роли в качестве информационных матриц. В отличие от глини, информация кодируется не расположением дефектов, а расположением трехвалентных катионов  $M^{3+}$  внутри одного слоя  $M(OH)_2$ . Дело в том, что трехвалентных катионов внутри слоев всегда меньше, чем двухвалентных, и их размещение может быть разным в зависимости от их относительных количеств.

Рассмотрим простой пример. Пусть двухвалентными катионами в слоях являются катионы магния,  $Mg^{2+}$ , а трехвалентными – катионы алюминия,  $Al^{3+}$ . При взгляде на слой сверху, он будет выглядеть как мозаика, составленная из шестиугольных ячеек, подобно пчелиным сотам (*рис. 1а*). Условимся, что если «ячейка» занята катионом  $Mg^{2+}$ , она имеет белый цвет, если катионом  $Al^{3+}$  – черный. На *рис. 1б* показана мозаика, образуемая катионами  $Al^{3+}$  в слое при соотношении  $Mg:Al=2:1$ . Почему отношение именно такое? Заметим, что каждая белая ячейка соседствует с тремя черными, тогда как каждая черная ячейка – с шестью белыми. Таким образом, отношение количества белых ячеек к количеству черных равно  $6:3=2:1$ . При соотношении  $Mg:Al=3:1$  можно составить мозаику, изображенную на *рис. 1в*. Нетрудно заметить, что мозаики, показанные на *рис. 1б* и в являются периодическими – они закономерно повторяются в плоскости через определенный период. Информационная емкость таких периодических мозаик невелика (вспомним, что Э. Шредингер определял ген как аperiodический кристалл!). Основная идея Гринвелла и Ковини состоит в том, что расположение черных ячеек (= трехвалентных ка-



**Рис. 1.** Двойной гидроксидный слой как мозаика из гексагональных ячеек (а), периодические мозаики с соотношением белых и черных ячеек 2:1(б) и 3:1 (в), непериодическая мозаика (г)

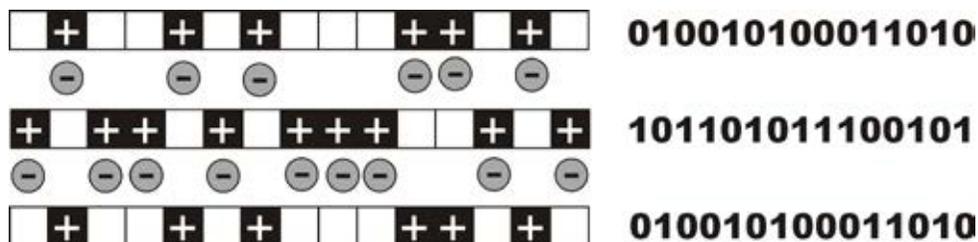
тионов) может быть непериодическим и посредством этого обладать высокой информационной емкостью (пример непериодической мозаики показан на *рис. 1г*). Предположим, что это действительно имеет место. Каков же тогда механизм передачи информации от слоя к слою и от кристалла к кристаллу? Гринвелл и Ковини рисуют следующую схему (*рис. 2*). Посмотрим на слой с торца как на состоящий из положительно заряженных черных ячеек (они соответствуют позициям катионов  $Al^{3+}$ ) и электронейтральных белых ячеек

(позиции  $Mg^{2+}$ , их заряд уже скомпенсирован гидроксил-ионами  $OH^-$  из ближайшего окружения). К положительно заряженным ячейкам в межслоевом пространстве прикрепляются отрицательно заряженные анионы (на *рис.3* они показаны кружками). Заряды ячеек и анионов взаимно компенсируются и в следующем слое черные ячейки будут располагаться не под кружками, а между ними. Можно сказать, что последовательности ячеек I и II будут комплементарны: черные ячейки в одном слое заменяются на белые, и наоборот. Следующее по счету межслоевое пространство – между слоями II и III – будет иметь уже другое строение: анионы (кружки) будут прикреплены к черным ячейкам слоя II. Тогда третий слой III будет комплементарен слою II, т.е. идентичен слою I. В свою очередь, четвертый слой будет идентичен второму и т.д. Таким образом, в кристалле будет осуществляться перенос информации в направлении, перпендикулярном ориентации слоев. Каждый новый нарастающий слой будет иметь структуру, комплементарную поверхностному слою. При расщеплении кристалла будут образовываться информационные дубликаты, с которых будут считываться информация каждые новые нарастающие слои. Так, по модели авторов работы [8], слоистые двойные гидроксиды смогут осуществлять хранение, передачу и дубликацию информации. Поскольку эти соединения существуют в виде минералов (для них известно по крайней мере 40 различных минеральных видов [9]), причем некоторые из них были весьма распространенными в позднеархейском океане [10], то есть, на заре зарождения жизни, гипотеза о том, что слоистые двойные гидроксиды могли иметь отношение к возникновению генетического кода, выглядит весьма правдоподобной. Но, несмотря на это, и она нуждается в экспериментальной проверке. Ведь если она справедлива, слоистые двойные гидроксиды можно использовать как информационные матрицы в разнообразных технологиях, связанных с неэлектромагнитными носителями информации колоссальной емкости. Правда, уже само представление кристаллической структуры как электрической схемы с точечными зарядами является весьма серьезным упрощением (в этом можно убедиться, ознакомившись с любым учебником по кристаллохимии), но нас будут интересовать именно экспериментальные данные. При этом интересно обратиться прежде всего к природным объектам, так как именно они рассматриваются как предшественники генетических матриц в живых организмах.

Наиболее распространенными минералами из группы слоистых двойных гидроксидов являются гидроталькит и манассеит. Эти два минерала имеют одну и ту же химическую формулу –  $[Mg_3Al(OH)_2(CO_3)(H_2O)]^8$ . В этой формуле в квадратных скобках указан состав одного слоя из октаэдров, т.е. двойного гидроксидного слоя. Как видно, соотношение  $Mg:Al$  равно 3:1, а в качестве анионов в межслоевом пространстве выступают карбонат-ионы  $CO_3^{2-}$ . Гидроталькит и манассеит различаются только последовательностью расположения слоев в структуре, и мы не будем останавливаться на этом подробно.

Одними из наиболее красивых образцов манассеита в мире еще недавно считались образцы из Ковдорского железорудного месторождения, впервые описанные там доцентом кафедры минералогии Ленинградского

(ныне Санкт-Петербургского) государственного университета Ольгой Михайловной Римской-Корсаковой (внучкой знаменитого композитора и родной сестрой автора романа «Побежденные» Ирины Михайловны Римской-Корсаковой). Крупные, прозрачные, хорошо ограненные, с различными оттенками желтого и красного цветов, кристаллы ковдорского манассеита привлекают внимание не только любителей камня, но и каждого, кто способен оценить красоту минерального царства (*рис.2 цветной вкладки*). Автору этих строк совместно с сотрудниками отдела наноматериаловедения Кольского научного центра Российской академии наук (г. Апатиты Мурманской области) посчастливилось исследовать эти прекрасные создания природы с использованием комплекса современных методов



**Рис. 2.** Схема передачи генетической информации в слоистых двойных гидроксидов по Гринвеллу и Ковини [8]. Черные квадраты обозначают позиции трехвалентных катионов, кружки – позиции межслоевых анионов. Механизм подразумевает комплементарность двух последовательных слоев, что может быть отражено в бинарной записи (слева; 0 обозначает позиции катионов Mg<sup>2+</sup>, 1 – позиции катионов Al<sup>3+</sup>)

изучения вещества [11-14]. Первые же исследования химического состава показали, что манассеит – увы! – таковым не является. Отношение Mg:Al в нем составляет не 3:1 (как должно быть в манассеите), а 2:1. Таким образом, ковдорский манассеит на самом деле является квинтинитом, то есть, аналогом минерала, открытого в 1990-х гг. канадскими учеными в месторождении Сент-Илер в канадской провинции Квебек [15]. Чуть ранее такой же минерал был описан в совместной работе российских кристаллографов и аргентинских минералогов [16], но канадцы оказались первыми в получении статуса первооткрывателей минерального вида.

Изучение кристаллической структуры дало еще более интересные результаты. С использованием современных дифрактометров с плоскими детекторами рентгеновских лучей удалось выяснить, что в подавляющем большинстве ковдорских квинтинитов катионы Mg<sup>2+</sup> и Al<sup>3+</sup> расположены закономерно, составляя мозаику, представленную на *рис. 2б*. Информационная емкость такой мозаики чрезвычайно мала и какую-либо серьезную информацию закодировать в ней не удастся. Любопытным оказалась также и

структура межслоевого пространства. Вместо идеализированной схемы расположения анионов под (или над) позициями трехвалентных катионов (как было предложено Гринвеллом и Ковини), в структуре наблюдается сильно разупорядоченное положение карбонатных треугольников  $\text{CO}_3^{2-}$  и молекул воды. Для того чтобы это выяснить, пришлось построить распределение электронной плотности на уровне межслоевого пространства. Дело в том, что рентгеновские лучи рассеиваются именно электронными и при помощи рентгеновской дифракции удастся определить не что иное, как распределение электронной плотности, которое количественно выражается в числе электронов (e-) на единицу объема (например, на кубический ангстрем,  $1 \text{ \AA}^3 = 10^{-27} \text{ м}^3$ ). На **рис.3а цветной вкладки** показано сечение распределения электронной плотности на межслоевом уровне. Интенсивность окраски (от темно-синего до красного) соответствует увеличению значения электронной плотности. Красные переливающиеся торы («баранки») соответствуют максимумам электронной плотности ( $> 1,5 \text{ e-/\AA}^3$ ), внутри них электронная плотность понижается до примерно  $0,5 \text{ e-/\AA}^3$ . Такой характер распределения электронной плотности объясняется тем, что в структуре треугольные группы  $\text{CO}_3^{2-}$  находятся в сильном беспорядке и то, что мы видим на **рис.3а цветной вкладки** есть результат наложения (суперпозиции) сразу нескольких основных расположений. **Рис. 3б цветной вкладки** показывает модель расположения атомных группировок в межслоевом пространстве ковдорского квинтинита (серые атомы – углерод, красные – кислород). Иными словами, реальная атомная структура весьма далека от схемы Гринвелла и Ковини – внутри двойных слоев катионы располагаются упорядоченно периодически, а анионы в межслоевом пространстве, наоборот, неупорядоченно. Таким образом, минералы группы квинтинита не могут быть информационными матрицами, в которых информация кодируется за счет катионной мозаики внутри слоев. Правда, это касается только отношения  $\text{Mg:Al}$ , равного 2:1. Но в природе существует большое количество минералов с отношением  $\text{Mg:Al}=3:1$ . Как быть с ними? Может быть, в них можно достичь информационно емкой катионной мозаики? Действительно, за редкими исключениями, рентгеновская дифракция не дает упорядоченной картины распределения катионов для минералов с  $\text{Mg:Al}=3:1$ .

Но ведь рентгеновская дифракция дает результаты по усредненной по объему структуре. Значит, для того, чтобы выяснить особенности распределения катионов внутри отдельного слоя, надо исследовать именно отдельный слой. Такого рода исследования были проведены японскими учеными [17]. Пластинку искусственного гидроталькита они обрабатывали в растворе ферроцианида калия. При этом крупные ионы  $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^-$  адсорбировались на поверхности пластинки. Поскольку эти ионы заряжены отрицательно, было естественно ожидать, что их позиции будут соответствовать центрам положительных зарядов, то есть катионам  $\text{Al}^{3+}$ . Для того, чтобы это выяснить, поверхность гидроталькитового кристалла изучалась при помощи атомно-силовой сканирующей микроскопии. Как оказалось, ферроцианид-ионы образовали на поверхности правильный узор, соответствующий мозаике, показанной на **рис. 1в**. На основании этого был сделан вывод о том, что и катионы

$Al^{3+}$  расположены в гидроталькитовом слое закономерно. Но почему тогда не удается «увидеть» этого при помощи рентгеновской дифракции? Ответ прост: катионы внутри слоев упорядочены, но слои находятся в неупорядоченном отношении друг относительно друга. Порядок в направлении, перпендикулярном слоям, нарушается и рентгеновская дифракция дает сбой.

Таким образом, результаты самых разнообразных экспериментальных исследований показывают, что минералы и вообще кристаллы не могут служить надежными информационными матрицами, в которых информация закодирована или в виде дефектов, или в виде атомных мозаик. В первом случае уровень информационного шума настолько высок, что информационный канал оказывается абсолютно ненадежным. Во втором случае распределение атомов и ионов подчиняется скорее простым физико-химическим закономерностям (например, наиболее экономичному размещению одноименных зарядов), чем необходимостью сохранения и передачи информации. В живых организмах генетическая система подчинена цели воспроизводства следующего поколения организмов, в минералах такой цели нет. Они существуют и развиваются без стабильного механизма наследственности. Если где-то и искать предшественников генетического кода, то не в минералах и не в неорганической природе.

В статье использованы результаты, полученные в рамках выполнения проекта РФФИ 10-05-00431.

## Литература

1. *Yockey H.P.* Information Theory, Evolution, and the Origin of Life. Cambridge University Press, 2005.
2. *Maynard Smith J.* The concept of information in biology // *Philosophy of Science*. – 2000. – Vol. 67. – P. 177–194.
3. *Галимов Э.М.* Феномен жизни. Между равновесием и нелинейностью. Происхождение и принципы эволюции. М.: Книжный дом «Либроком». – 2008.
4. *Cairns-Smith, A.G.* Genetic Takeover and the Mineral Origins of Life. Cambridge University Press, 1982.
5. *Юшкин Н.П.* Биоминеральные гомологии // *Тр. Ин-та геол. Коми НК УрО РАН. Сыктывкарский минерал.* сб. 2000. – № 29. – С. 5–27.
6. *Федонкин М.А.* Роль водорода и металлов в становлении и эволюции метаболических систем. В кн.: Проблемы зарождения и эволюции биосферы (Под ред. Э.М.Галимова). М.: Книжный дом «Либроком». – 2008. – С. 417–437.
7. *Bullard T., Freudenthal J., Avagyan S., Kahr B.* Test of Cairns-Smith's 'crystals-as-genes' hypothesis // *Faraday Discussions*. – 2007. – Vol. 136. – P. 231–245.
8. *Greenwell H.C., Coveney P.V.* Layered double hydroxide minerals as possible prebiotic information storage and transfer compounds // *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*. – 2006. – Vol. 36. – P. 13–37.
9. *Krivovichev S.V., Yakovenchuk V.N., Zhitova E.S.* Natural double layered hydroxides: structure, chemistry, and information storage capacity. В кн.: *Minerals as Advanced Materials II* (ed. S.V. Krivovichev). – 2012. Springer, Heidelberg. – PP. 87–102.
10. *Arrhenius G.O.* Crystals and life // *Helvetica Chimica Acta*. – 2003. – Vol. 86. – P. 1569–1586.

11. Krivovichev S.V., Yakovenchuk V.N., Zhitova E.S., Zolotarev A.A., Pakhomovsky Y.A., Ivanyuk G.Y. Crystal chemistry of natural layered double hydroxides. 1. Quintinite-2H-3c from the Kovdor alkaline massif, Kola peninsula, Russia // Mineralogical Magazine. – 2010. – Vol. 74. – P. 821–832.
12. Krivovichev S.V., Yakovenchuk V.N., Zhitova E.S., Zolotarev A.A., Pakhomovsky Y.A., Ivanyuk G.Y. Crystal chemistry of natural layered double hydroxides. 2. Quintinite-1M: First evidence of a monoclinic polytype in M<sup>2+</sup>-M<sup>3+</sup> layered double hydroxides // Mineralogical Magazine. – 2010. – Vol. 74. – P. 833–840.
13. Krivovichev S.V., Yakovenchuk V.N., Zolotarev A.A., Ivanyuk G.Y., Pakhomovsky Y.A. Cation ordering and superstructures in natural layered double hydroxides // Chimia. – 2010. – Vol. 64. – P. 730–735.
14. Zhitova E.S., Yakovenchuk V.N., Krivovichev S.V., Zolotarev A.A., Pakhomovsky Y.A., Ivanyuk G.Y. Crystal chemistry of natural layered double hydroxides. 3. The crystal structure of Mg, Al-disordered quintinite-2H // Mineralogical Magazine. – 2010. – Vol. 74. P. 841–848.
15. Chao G.Y., Gault R.A. Quintinite-2H, quintinite-3T, charmarite-2H, charmarite-3T, and caresite-3T, a new group of carbonate minerals related to the hydrotalcite-manasseite group // Can. Mineral. – 1997. – Vol. 35. – P. 1541–1549.
16. Аракчеева А.В., Пуцаровский Д.Ю., Расцветаева Р.К., Атенцио Д., Лубман Г.У. Кристаллическая структура и сравнительная кристаллохимия Al<sub>2</sub>Mg<sub>4</sub>(OH)<sub>12</sub>(CO<sub>3</sub>)•3H<sub>2</sub>O, нового минерала из группы гидроталькита-манасеита // Кристаллография. – 1996. – Т. 41. – С. 1024–1034.
17. Yao K., Taniguchi M., Nakata M., Takahashi M., Yamagishi A. Nanoscale imaging of molecular adsorption of metal complexes on the surface of a hydrotalcite crystal // Langmuir. – 1998. – Vol. 14. – P. 2410–2414.

# Два чуда антарктического озера Восток

С.В. Попов

**С.В. Попов,**  
доктор геолого-минералогических наук, сотрудник Полярной морской геологоразведочной экспедиции, Санкт-Петербург (ФГУНПП ПМГРЭ), начальник радиолокационного отряда Антарктической геофизической партии, награжден медалью ордена «За заслуги перед отечеством» II степени «За большой личный вклад в организацию и осуществление проекта проникновения в подледниковое озеро Восток (Антарктида) в рамках Федеральной целевой программы «Мировой океан»  
Проект РФФИ № 13-05-11503

*«...период географических открытий  
еще не завершён»  
В.М. Котляков*

На протяжении всей истории человечества один за другим наука преподносила людям сюрпризы. Эпоха Великих географических открытий, начало которой принято связывать с открытием морского пути в Индию португальскими мореплавателями в конце XV в., в корне перевернула представления о мире. Вдруг выяснилось, что один из догматов того времени – карта мира Клавдия Птолемея, может быть не верна. В результате последующих примерно двухсот лет человечество увидело очертания берегов Нового Света: американского континента, Кубы, Гаити, Австралии и Новой Зеландии. Таким образом, к началу XVIII в. считалось, что представления о географии нашей планеты в целом достаточно полны. Однако в 1820 г. русская экспедиция под командованием капитана 2-го ранга Ф.Ф. Беллинсгаузена и лейтенанта М.П. Лазарева сделала еще одно весьма значимое открытие. Человек впервые увидел новый, неизвестный ранее материк – Антарктиду. Природа преподнесла еще один сюрприз, доказав тем самым, как мало мы знаем о своем собственном доме – о нашей планете.

Шли годы, и к новому материка одна за другой отправлялись экспедиции. На смену географическим описаниям пришли геофизические и геологические методы исследований, которые все больше и больше расширяли наше представление об Антарктиде. Активизация изучения нового материка началась во второй половине 1950-х гг., в ходе проведения грандиозного научно-исследовательского мероприятия Международного Геофизического Года (оно осуществлялось в период с 1 июля 1957 г. по 31 декабря 1958 г.). С этих пор, по сути, разрозненные экспедиции сменились планомерными исследованиями материка.

Вторая половина XX в. ознаменовалась небывалым доселе уровнем научных и технических достижений. Технологический прорыв принес человечеству качественно новые знания о нашей планете, а облетов вокруг Земли и вступив на поверхность Луны, оно активно начало изучать и ближний космос – Солнечную систему. Казалось, что все значимые географические открытия уже сделаны. Так думали до первой половины 90-х гг. ушедшего века.

Но природа постоянно преподносит человеку сюрпризы. В 1993 г. в гляциологическом журнале была опубликована статья, которая в переводе с английского языка называлась примерно так: «Идентификация подледниковых озер посредством спутникового высотомера ERS-1» [14]. В ней говорилось о том, что спутниковые данные указывают на возможность существования обширного подледникового водоема, расположенного к северу от российской внутриконтинентальной станции Восток. Именно в этой статье впервые прозвучало и новое географическое название – озеро Восток. Окончательно это открытие было закреплено после детального анализа и переосмысления всех имевшихся к тому моменту данных в работе [11], опубликованной в журнале *Nature*.

Это известие прогремело как гром среди ясного неба. Причина состояла вовсе не в том, что ученые предположили наличие какого-то подледникового водоема. Надо сказать, что к тому времени само по себе это уже не было чем-то особенно выдающимся. Существование подобных объектов было теоретически предсказано И.А. Зотиковым еще в середине прошлого века [1], а к 1993 г. методом радиолокации было выявлено уже более пятидесяти подобных объектов [14]. Причина небывалого энтузиазма ученых заключалась в двух важных обстоятельствах. Первое состояло в том, что озеро Восток, по сравнению со всеми открытыми ранее подледниковыми водоемами, имеет поистине грандиозные размеры: около 270×70 км при площади водного зеркала 15425 кв. км [7]. Таким образом, оно попадает в двадчатку крупнейших озер нашей планеты и занимает промежуточное место между Онежским и Ладожским озерами, площади акваторий которых составляют 9720 кв. км и 17700 кв. км соответственно [3]. Второе обстоятельство весьма прагматично. Дело в том, что на станции Восток, которая находится на леднике над акваторией озера, начиная с 1970 г. осуществляется керновое бурение. На момент опубликования работы [14], забой пятой скважины (она была заложена в 1990 г.) располагался на глубине 2755 м [17], т.е. примерно в километре от поверхности озера. Последнее обстоятельство открывало небывалые перспективы в изучении прошлого нашей планеты. Ведь озеро Восток было

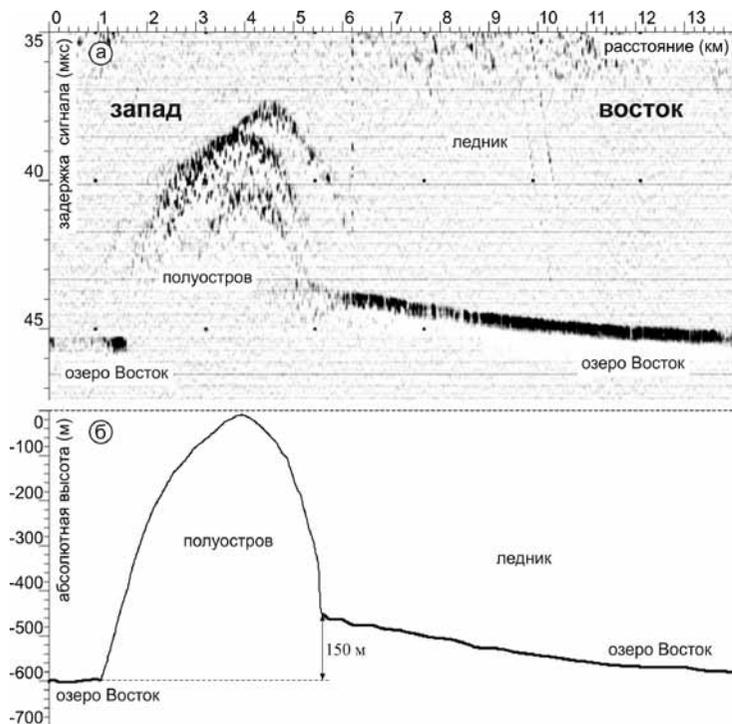
в полной изоляции на протяжении миллионов лет и, следовательно, в нем вполне могла сохраниться флора и фауна того времени! И это лишь один из многочисленных научных аспектов изучения озера Восток. Именно поэтому его открытие называют одним из величайших открытий конца XX в. Тот факт, что в наше время был обнаружен географический объект, размеры которого превышают территорию Черногории и Доминиканской республики вместе взятых, еще раз подтверждает истину о том, как мало мы знаем о своем собственном доме, о планете, на которой живем.

Открытие озера Восток послужило толчком к пересмотру имевшихся радиолокационных данных, а также к более глубокому анализу результатов новых геофизических работ. Это привело к тому, что на сегодняшний день в Антарктиде открыто 414 подледниковых водоемов [7, 19], причем 56 из них расположены вокруг озера Восток [7]. Их положение показано на *рис.1 цветной вкладки*

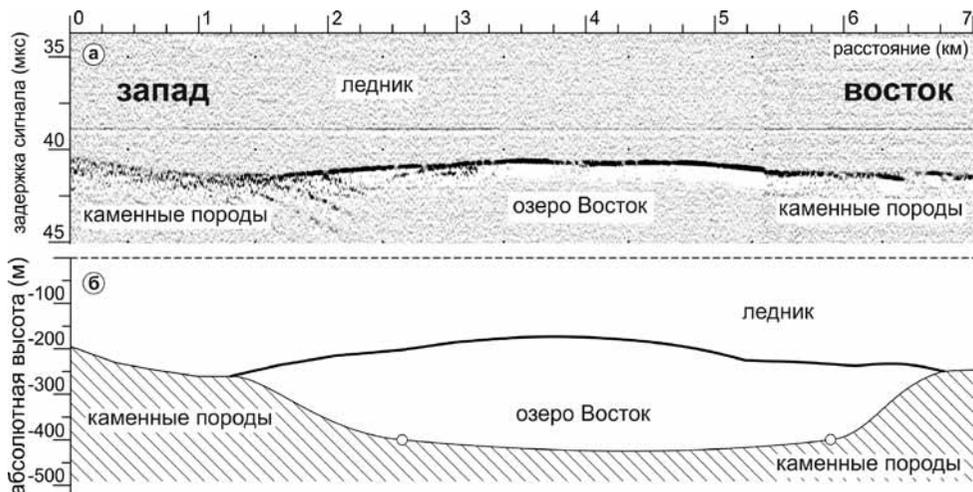
Практически сразу после открытия озера Восток наша страна приступила к его планомерному изучению двумя дистанционными геофизическими методами: сейсмическими зондированиями методом отраженных волн (МОВ) и радиолокационному профилированию. Эти работы выполнялись в период 1995–2008 гг., преимущественно с использованием наземной геофизической лаборатории, созданной на базе жилого комплекса «Витязь» (*рис.2 цветной вкладки*). Целью сейсмических исследований являлось инструментальное измерение глубин озера; целью радиолокационных – определение его береговой линии, толщин ледника и высот подледного рельефа. За эти годы было выполнено 318 сейсмических зондирований и 5190 пог. км радиолокационных маршрутов [4, 6, 7]. Существенный вклад в изучение озера Восток внесли наши зарубежные коллеги. В сезон 2000–2001 гг. американские ученые провели комплексную аэрогеофизическую съемку по регулярной сети маршрутов широтного простираия. Их общая протяженность составила 12464 км [15]. Положение названных геофизических работ приведено на *рис.3 цветной вкладки*. На этом же рисунке показан подледный рельеф этого района.

Озеро Восток – это абсолютно иной, чудесный мир и аналогов ему нет на всей нашей планете. Первое чудо – это, бесспорно, его поверхность. Она не горизонтальная, как у обычного водоема, а наклонная. Это связано с законом гидростатики, того самого, который, согласно преданию, позволил Архимеду вывести «на чистую воду» ювелиров, изготовивших корону для царя Гиерона. Этот закон устанавливает взаимосвязь между высотой ледника и его толщиной для акватории озера Восток для стационарного состояния. В направлении с юга на север поверхность водного зеркала имеет слабый наклон примерно в 6 угловых минут, но это приводит к перепаду высот между южной и северной частями примерно с –150 м до –600 м относительно уровня моря (*рис.3 цветной вкладки*) [6].

Помимо этого, поверхность озера имеет локальные неровности, которые местами превышают сотню метров! В частности, радиолокационные данные, на которых базируются наши представления о его поверхности, показывают, что она с одной и с другой стороны от одного из полуостровов отличается примерно на 150 м! Названная величина превышает высоту пирамиды Хеопса (138,75 м) и собора Петропавловской крепости в Санкт-Петербурге



**Рис.1.** Временной радиолокационный разрез (а) и разрез ледникового покрова (б) по маршруту М-1. Утолщенная линия соответствует поверхности озера Восток.



**Рис.2.** Временной радиолокационный разрез (а) и разрез ледникового покрова (б) по маршруту М-2. Точками показаны отражающие площадки по сейсмическим данным. Утолщенная линия соответствует поверхности озера Восток. Положение маршрута показано на рис. 3.

(122,5 м). На *рис. 1* приведен временной радиолокационный разрез и разрез ледникового покрова по маршруту М-1, иллюстрирующий этот феномен.

Как такое может быть? Причина состоит в локальном нарушении закона гидростатики, которое связано с движением ледника. Оно небольшое, всего около 2 м/год [18], но этого вполне достаточно для нарушения условия стационарности ледника в районе береговой линии. С запада от бухты ледник, из-за шероховатой поверхности каменного ложа, имеет меньшую скорость. В какой-то момент он пересекает береговую линию и оказывается на акватории озера. Каменное ложе сменяется водой, что ведет к уменьшению трения, а значит – к увеличению скорости течения ледника. Но буквально через несколько километров на пути ледника встает преграда: полуостров. Это заставляет его приостанавливаться и притопляться, что и ведет к увеличению его толщины.

Второе чудо также связано с поверхностью озера. На *рис. 2* приведен временной радиолокационный разрез и разрез ледникового покрова по маршруту М-2, на котором отчетливо видно, что поверхность озера имеет выпуклую форму. Как такое возможно? Ответ дает радиолокационное профилирование, выполненное на другом конце нашей планеты: на исландском леднике Skaftárkatlar [16]. Этот остров знаменит своими вулканами и геотермальными источниками. В результате повышенного выделения тепла на контакте льда и каменных пород происходит локальное донное таяние. Но тепла недостаточно, чтобы растопить весь ледник, и в этом случае образуется подледниковый водоем. Его поверхность имеет выпуклую форму, которая соответствует положению в пространстве изотермы таяния льда. Метод аналогии позволяет с высокой долей уверенности предполагать, что именно повышенный тепловой поток Земли сформировал выпуклую поверхность озера Восток в одном из проливов [5, 6].

Данное предположение нашло косвенное подтверждение биологически, гляциологическими и сейсмологическими данными. В керне скважины 5Г, расположенной на станции Восток, на глубине 3607 м, были обнаружены термофильные бактерии *Hydrogenophilus thermoluteolus*. Известно, что 50°C является оптимальной температурой для их роста и развития [9, 13]. Кроме того, предположение о геотермальной активности на дне озера Восток в прошлом или настоящем было также высказано на основе выявленной аномальной концентрации дейтерия в керне озерного льда из той же скважины [10, 13]. И наконец, сейсмологические данные указывают на то, что в районе депрессии, к которой приурочено озеро Восток, имеется увеличение теплового потока, связанное с современной тектонической активностью [2].

Таким образом, вполне вероятно, что дно озера Восток изобилует геотермальными источниками. Возможно, они распространены и за его пределами и именно благодаря им вокруг озера имеется 56 выявленных на сегодняшний день подледниковых водоемов.

Озеро Восток – это уникальный природный объект, аналогов которому нет на нашей планете. Его изучение продолжается, и я убежден, в скором времени принесет новые открытия, которые расширят наше представление о прошлом и настоящем мира, в котором мы живем, ведь «...период географических открытий еще не завершен».

## Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта 2 подпрограммы «Антарктика» ФЦП «Мировой океан», а также при финансовой поддержке РФФИ: гранты 09-05-00820-а (Расчет циркуляции и теплового режима подледникового озера Восток при помощи трехмерной негидростатической гидродинамической модели), 100591330ННИОа (Геометрия и динамика подледниковых водоемов Восточной Антарктиды) и 120500868а (Оценка стабильности подледникового озера Восток по данным глубокого бурения и геофизических исследований).

## Литература

1. *Зотиков И.А.* Тепловой режим ледника Центральной Антарктиды. – Бюлл. САЭ. – 1961, вып. 28. – С 16–21.
2. *Исанина Э.В., Крупнова Н.А., Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В.* О глубинном строении котловины Восток (Восточная Антарктида) по материалам сейсмологических наблюдений. – Геотектоника. – 2009, № 3. – С. 45–50.
3. *Малый атлас мира* – ред. Н.М. Терехов, М.: ГУГК. – 1981. – 147 с.
4. *Масолов В.Н., Попов С.В., Лукин В.В., Попков А.М.* Характер рельефа дна и водного тела подледникового озера Восток, Восточная Антарктида. – Доклады РАН. – 2010. – Т. 433, № 5. – 693–698.
5. *Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М.* Отечественные сейсмические и наземные радиолокационные исследования в Центральной Антарктиде накануне Международного полярного года 2007-2008. – МГИ 2007, вып. 103. – С. 107–117.
6. *Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М.* Коренной рельеф и ледниковый покров района подледникового озера Восток (Восточная Антарктида). – Лёд и снег. – 2011, № 1(113). – С. 25–35.
7. *Попов С.В., Черноглазов Ю.Б.* Подледниковое озеро Восток, Восточная Антарктида: береговая линия и окружающие водоемы. – Лёд и снег. – 2011, № 1(113). – 13–24.
8. Antarctic Digital Database (ADD), Version 2.0. Manual and bibliography. – Scientific Committee on Antarctic Research, British Antarctic Survey, 1998, Cambridge.
9. *Bulat S.A., Alekhina I.A., Blot M., Petit J.-R., Waggenbach D., Lipenkov V.Ya., Raynaud D., Lukin V.V.* Thermophiles microbe signature in Lake Vostok, Antarctica. – Abstracts of AGU Spring Meeting, Washington, D.C, 2002, B21A-04.
10. *Ekaykin A.A., Lipenkov V.Y., Petit J.R., Johnsen S., Jouzel J., Masson-Delmotte V.* Insights into hydrological regime of Lake Vostok from differential behavior of deuterium and oxygen-18 in accreted ice. – JGR, 2010, 115(C05003): 1-14. doi: 10.1029/2009JC005329.
11. *Kapitsa A.P., Ridley J.K., Robin G.D., Siegert M.J., Zotikov I.A.* A large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica. – Nature. – 1996. – Vol. 381, No 6584, 684–686.
12. *Liu H., Jezek K., Li B., Zhao Z.* Radarsat Antarctic Mapping Project digital elevation model version 2. – Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. – 2001. – Digital media.
13. *Petit J.-R., Alekhina I., Bulat S.* Lake Vostok, Antarctica: Exploring a Subglacial Lake and Searching for Life in an Extreme Environment. – In: Lectures

in *Astrobiology*, 2005, vol. I, Series: Advances in Astrobiology and Biogeophysics, Gargaud M., Barbier B., Martin H., Reisse J. (Eds.), Springer, 227–288.

14. Ridley J.K., Cudlip W., Laxon W. Identification of subglacial lakes using ERS-1 radar altimeter. – *J. Glaciol.* – Vol. 39, No 133. – 1993. – PP. 625–634.

15. Studinger M., Bell R., Karner G.D., Tikku A.A., Holt J.W., Morse D.L., Richter T.G., Kempf S.D., Peters M.E., Blankenship D.D., Sweeney R.E., Rystrom V.L. Ice cover, landscape setting and geological framework of Lake Vostok, East Antarctica. – *EPSL*, 205, 2003, 195–210.

16. Thorsteinsson T., Gaidos E.J., Gíslason S.R., Jóhannesson T., Kristjánsson J.K., Lanoil B., Marteinsson V.P., Skidmore M., Thorsteinsson T. Glaciological, hydrological, geochemical and biological investigations of the subglacial lakes beneath Skaftárkatlar, Western Vatnajökull, Iceland. – IGS international symposium on Earth and planetary ice–volcano interactions, Reykjavík, Iceland, June 19–23, 2006, Abstracts. – 2006, 45A071.

17. Vasiliev N.I., Talalay P.G., Bobin N.E., Chistyakov V.K., Zubkov V.M., Krasilev A.V., Dmitriev A.N., Yankilevich S.V., Lipenkov V.Ya. Deep drilling at Vostok station, Antarctica: history and recent events. – *Ann. Glaciol.* – 2007. – 47. – 10–23.

18. Wendt J., Dietrich R., Fritsche M., Wendt A., Yuskevich A., Kokhanov A., Senatorov A., Lukin V., Shibuya K., Doi K. Geodetic observations of ice flow velocities over the southern part of subglacial Lake Vostok, Antarctica, and their glaciological implications. – *Geophys. J. Int.* – 2006. – 166, 991–998.

19. Wright A., Siegert M.J. The identification and physiographical setting of Antarctic subglacial lakes: an update based on recent geophysical data for Subglacial Antarctic Aquatic Environments. – In: *Subglacial Antarctic Aquatic Environments* (M. Siegert, C. Kennicutt, B. Bindschadler, eds.). AGU Geophysical Monograph 192. Washington DC, 2011, 9–26.

# Асимметрия – вот достойная проблема!

Ю.Л. Войтеховский

*Юрий Леонидович Войтеховский, директор Геологического института Кольского НЦ РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор, преподаёт геологические и математические дисциплины в Кольском филиале Петрозаводского госуниверситета и Апатитском филиале Мурманского гостехуниверситета, председатель Кольского отделения РМО, председатель Комиссии по истории РМО, член Союза журналистов России, лауреат конкурсов научно-популярных статей РФФИ 2003, 2009 и 2011 гг., научный профиль – математические идеи и методы в естественных науках. Проект РФФИ № 13-05-11505*

Статья посвящена популярному изложению фундаментальной междисциплинарной проблемы – довлеющей асимметрии в многообразии выпуклых полиэдров, выявленной в результате длительных компьютерных вычислений. Результат можно было бы посчитать сугубо теоретическим, если бы природа упорно не воспроизводила его в мириадах форм кристаллов минералов и организмов. И не значит ли это, что он имеет отношение к фундаментальным свойствам пространства?

## Интуиция или точное знание?

Что позволяет нам ориентироваться в мире: интуиция или точное знание? Конечно, и то и другое. Но что движет нами в большей степени? Акценты всяк может расставить по-своему. Казалось бы, представитель науки должен отдать приоритет точному знанию. Но не всё так просто. Если вдуматься, интуиция рождается вместе с нами и пре-подносит мир понятным, не раскладывая на детали и причинно-следственные цепочки. Научное знание делает его таковым лишь после трудного процесса понимания. Есть проблема, в которой каждый может проверить свою интуицию: о симметрии и асимметрии в

мире. В год 150-летия со дня рождения академика В.И. Вернадского эта тема особенно актуальна, ведь именно по характеристическим типам симметрии он предложил различать состояния пространств земной реальности [1, 2].

Меня с годами все больше занимает асимметрия природных объектов. Она все чаще бросается в глаза. Симметрия кажется грубой аппроксимацией действительности. Отклонения от симметрии уже не кажутся досадными флуктуациями... Впрочем, я не одинок. Вот что пишет член Союза писателей РФ Г.И. Спичак в своем новом романе: «Наши предки, наверно, не случайно боялись симметрии, зеркальных отражений, и Зло рисовалось ими в строгой «правильности». Ни дома, ни храмы не строились симметрично. Святая София в Великом Новгороде, как и сотни храмов домонгольского периода, не имели похожих стен и даже стен одинакового размера. Но сегодня нет тех храмов – несимметричных, как природа, дисгармоничных, как грешная человеческая душа. Домонгольских осталось одиннадцать... Вряд ли больше. Зато потом пошла строгая геометрия масонских архитекторов, постигающих Природу гармонии математикой. Че-го не смогли сделать внутри себя, постарались сделать снаружи...» [3, с. 269–270]. Взяв ключевое слово в кавычки, автор откровенно усомнился в «правильности» симметрии, если под правильностью понимать фундаментальные законы организации природы. Предоставляю историкам искусства, этнографам, археологам и архитекторам дискутировать по поводу приведенного тезиса. Для дальнейшего достаточно того, что Г.И. Спичак акцентировал внимание на фундаментальном характере асимметрии.

А вот пример из совсем другой культуры, слышущей самой продвинутой в со-зерцательном анализе природных форм и художественном формотворчестве. Tumi-ishī, гора камней – национальная японская игра для всех возрастов. Не странно ли видеть, как взрослые сосредоточенно пытаются выстроить из асимметричных полиэдрических «камней» как можно более высокую башню (*рис.1 цветной вкладки*)? Понятно, что она раз за разом падает. При этом игроку надлежит сохранять спокойствие. В том и состоит развивающий подтекст игры – воспитывать в ребенке и поддерживать во взрослом японце невозмутимый дух самурая, побеждающий превратности судьбы. Я не помню похожей игры в своем славянско-прибалтийском детстве. Здесь ощущается невидимый психологический рубеж. Кто-то играет устойчивыми пирамидками и кубиками – и вырастает подготовленным к детерминированной природе и стабильной экономике. Другой упорно строит падающие башни – и вырастает готовым к стохастической природе и экономическим кризисам. Если угодно – два различных мировоззрения. Возможно, я утрирую, но сказанное кажется мне важным даже в дискуссионной форме, как тест на интуицию. Что вам больше нравится, симметрия или асимметрия, покой или движение? Впрочем, далее речь пойдет не о детской педагогике или психологии творчества, а о симметрии и асимметрии в объектах природы. Тема сложна, даже неподъемна для одной научно-популярной статьи. Но давайте хотя бы прикоснемся к ней.

### **Исходные понятия и неожиданные результаты.**

В рассуждениях о симметрии и асимметрии для наглядности используем выпуклые полиэдры, подсказанные игрой Tumi-ishī. Потому что они

наглядным образом организованы из граней, пересекающихся по ребрам, встречающимся в вершинах. Потому что они пробуждают представления о кристаллах минералов и тем самым перебрасывают смысловой мост от математических абстракций к объектам природы. Потому что выпуклый полиэдр, рассмотренный как 3-связный планарный граф, допускает много других интерпретаций и приложений. Говоря о симметрии, будем подразумевать комбинаторную (топологическую) симметрию самого симметричного полиэдра данного комбинаторного типа. Под последним будем понимать принцип устройства полиэдра из данного набора граней. Ясно, что в каждом комбинаторном типе содержится бесконечное число полиэдров. Удобно заменить их самым симметричным представителем, а набор его граней выразить символом  $\langle n_3, n_4 \dots n_k \rangle$  – кортежем чисел  $k$ -угольных граней.

Несмотря на кажущуюся ясность категории симметрии, ее не просто определить по сути. Обычно под симметрией конечной формы понимают ее составленность из равных частей. Некоторым движением, физически реализуемым (повороты) или не реализуемым (отражения), одна часть формы переводится (или вовсе не переводится) в другую. Группа (понимаемая в точном алгебраическом смысле) движений, переводящих форму в себя, и характеризует ее симметрию. Что касается асимметрии, то сегодня не существует иного способа определить ее иначе, как через отрицание симметрии. Интуиция подсказывает, что она фундаментальным образом связана с движением, неустойчивостью и должна быть приспособлена к описанию именно этих функций природных систем.

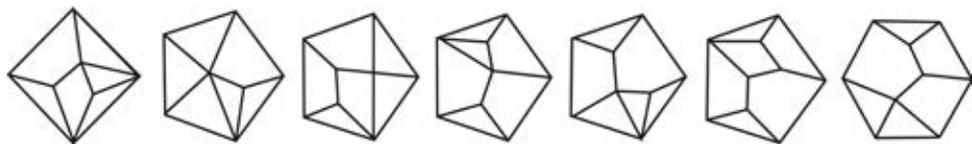
Первый и удручающий результат на сегодня состоит в том, что по символу  $\langle \dots \rangle$  в общем случае даже нельзя сказать, существует ли соответствующий полиэдр. Есть теоремы, утверждающие обратное – каких полиэдров быть не может. Так, теорема Эй-лера говорит, что нет выпуклого полиэдра, на котором одновременно отсутствовали бы 3-, 4- и 5-угольные грани. Другая теорема говорит, что на каждом выпуклом полиэдре обязаны присутствовать четверка, или тройка и пара, или три пары одноименных граней. Других – нет. Второй результат состоит в том, что точечные группы симметрии (оставляющие при каждом движении хотя бы одну неподвижную точку фигуры), используемые в минералогии и кристаллографии для описания форм кристаллов, и гран-ные символы в общем случае не связаны. Это скорее хорошо, чем плохо, поскольку две характеристики можно использовать как дополнительные при описании полиэдра.

Богатая история систематического изучения комбинаторного многообразия выпуклых полиэдров, охватившая вторую половину XIX и весь XX в., описана в монографиях [4, 5]. Результат может показаться скромным, ведь на сегодня перечислены, охарактеризованы точечными группами симметрии, гранными символами и нарисованы (!) «всего лишь» 4- ... 12-эдры и простые (в каждой вершине сходятся ровно три грани) 13- ... 16-эдры. Но обратите внимание на числа  $n$ -эдров с ростом  $n$  от 4 до 12: 1, 2, 7, 34, 257, 2606, 32300, 440564, 6384634; и простых  $n$ -эдров с ростом  $n$  от 13 до 16: 49566, 339722, 2406841, 17490241 – они растут быстрее, чем экспонента. А ведь это лишь начало многообразия. Разбиения классов  $n$ -эдров по числу вершин дано в *табл. 1*.



Что можно сказать о симметрии этого огромного числа выпуклых полиэдров? Все 4-, 5- и 6-эдры комбинаторно симметричны. Среди 7-эдров комбинаторно асимметричных 7 (20,588 %), 8-эдров – 140 (54,475), 9-эдров – 2111 (81,005), 10-эдров – 30014 (92,923), 11-эдров – 430494 (97,714), 12-эдров – 6336013 (99,238), среди простых 13-эдров – 47030 (94,884), 14-эдров – 331796 (97,667), 15-эдров – 2382352 (98,983), 16-эдров – 17411448 (99,550). В многообразии установлены полиэдры 24 кристаллографических (1, 2,  $m$ ,  $-1$ , 3, 222,  $mm2$ , 4,  $2/m$ ,  $-4$ , 32,  $-6$ , 3 $m$ , 4 $mm$ ,  $mmm$ ,  $-42m$ ,  $-6m2$ ,  $-3m$ , 6 $mm$ , 23, 4/ $mmm$ , 6/ $mmm$ ,  $-43m$ ,  $m3m$ ) и 20 некристаллографических (5 $m$ , 7 $m$ ,  $-82m$ , 8 $mm$ , 9 $m$ ,  $-10m2$ ,  $-5m$ , 10 $mm$ , 11 $m$ ,  $-12m2$ ,  $-7m$ ,  $-14m2$ , 8/ $mmm$ ,  $-18m2$ , 10/ $mmm$ ,  $-22m2$ , 12/ $mmm$ ,  $-26m2$ , 14/ $mmm$ ,  $-3-5m$ ), большей частью встреченных в биологических объектах, видов симметрии. Не найдены простейшие выпуклые полиэдры кристаллографических классов  $-3$ ,  $4/m$ , 422, 6,  $6/m$ , 622,  $m3$ , 432, что представляет интересную задачу.

Главный и неожиданный вывод состоит в том, что с ростом  $n$  доля комбинаторно асимметричных  $n$ -эдров асимптотически стремится к 100%! Но она возникает на определенном уровне сложности, а именно с 7-эдров (7 из 34, *рис. 1*) и далее стремительно нарастает. Среди малой толики симметричных форм преобладают (по убыванию) точечные группы симметрии  $m$ , 2 и  $mm2$ . На их фоне прочие группы симметрии встречаются крайне редко.



**Рис. 1.** Простейшие комбинаторно асимметричные полиэдры в проекции Шлегеля на одну из граней. Опрошенные мной минералоги не смогли нарисовать ни одного комбинаторно асимметричного полиэдра. Не потому ли, что в детстве они играли симметричными кубиками и пирамидками?

Энантиоморфизм (т.е. способность иметь зеркально-симметричного двойника, как правая и левая рука) допускают не только комбинаторно асимметричные формы. Важно, чтобы в их точечной группе симметрии содержались лишь повороты. Такая форма с группой симметрии 2 (ось симметрии II порядка, при полном повороте вокруг нее форма совмещается с собой 2 раза) впервые появляется среди 6-эдров, среди 7-эдров их уже 4, среди 8-эдров – 22, далее их число быстро растет. С ростом  $n$  постепенно проявляются новые энантиоморфные группы: 3 среди 9-эдров, 222 среди 10-эдров, 32 среди 11-эдров (*рис. 2*) и т.д. По-видимому, выявленные симметричные свойства комбинаторного многообразия выпуклых полиэдров – в особенности тотальная асимметрия – в целом характеризуют 3D евклидово пространство. Но тогда они должны отражаться в морфогенезе природных минеральных и биологических форм.

## Назревает революция?

Выше установлено, что с ростом числа граней доля комбинаторно асимметричных выпуклых полиэдров в их многообразии стремится к 100 %. Результат обескураживает, ведь категория асимметрии как таковая определена через отрицание симметрии. Самые симметричные полиэдры – тела Платона, Архимеда, Каталани – выделены в геометрии и философии как те, которыми стоит заниматься и восхищаться. Симметричные формы кристаллов распределены по 31 классу. В 32-ой – «примитивный» – собраны асимметричные кристаллические полиэдры. Но ведь их асимптотически 100%! О них – геометрических и кристаллографических изгоях – мы ничего не можем сказать, кроме того лишь, что они асимметричны. Налицо исторически сложившееся и терминологически закрепленное торжество меньшинства над довлеющим большинством. Похожие ситуации бывали в социальной истории... Так что же, назревает революция? Сама собой напрашивается идея о поиске принципа, который позволил бы переопределить асимметрию полиэдра позитивно и конструктивно, без отрицающей приставки «а». Как ни странно может показаться, для этого надо поговорить об именах.



**Рис. 2.** Простейшие полиэдры с точечными группами симметрии 3, 222 и 32. Чтобы отыскать оси симметрии, здесь придется потрудиться

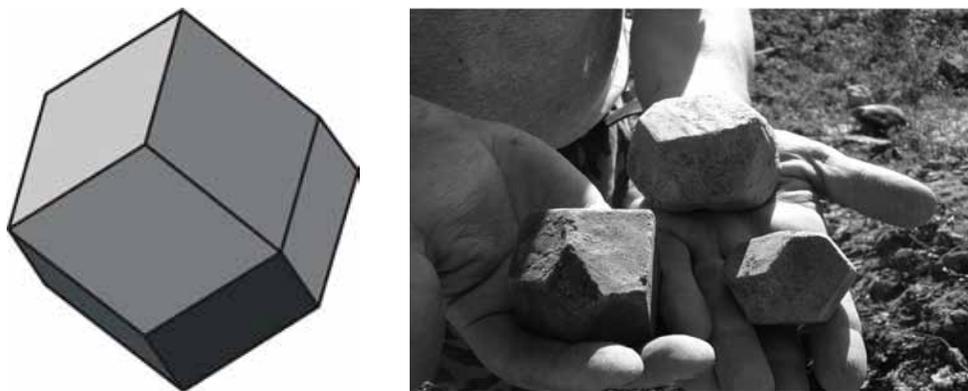
## Что в имени твоём?

Согласитесь, тема интересная и богатая. Каждый из нас интересовался своим именем и радовался, если оно происходит от греческого корня. А что же в мире полиэдров?

Рассмотрим выпуклые полиэдры, приятные глазу минералога – кристаллические закрытые простые формы. Вот куб, знакомый с детства. И нечего стесняться. У меня были замечательные кубики с буквами на гранях. Достались от старшего брата и пере-шли к младшей сестренке. Постепенно терялись и, наконец, куда-то пропали. Но свое дело сделали. Не в смысле изучения азбуки, а в смысле узнавания куба. Согласитесь, вы ведь тоже его ни с чем не спутаете: 6 квадратных граней сходятся по 3 в каждой из 8 вершин. Но вся эта конструкция возникает в сознании как рефлекс, а вовсе не из содержания слова «куб». Отдавая должное традиции, мы и впредь будем употреблять это краткое слово. Но давайте признаем, что это ярлык и не более того. Иногда куб называют гексаэдром. Это имя указывает на 6 граней. Но всего существуют 7 комбинаторно различных 6-гранников, 2 из них – с 8 вершинами [4, с. 15]. Еще менее информативны имена «октаэдр» и «додекаэдр», ведь 8-гранников 257, а 12-гранников 6384634 [4, с. 16–19, 390–832]. Среди «эдров» однозначно лишь одно имя – «тетраэдр». И то потому только, что есть единственный 4-эдр, все

грани 3-угольные и сходятся по 3 в каждой из 4 вершин. Предельная простота подчеркивается его другим именем – симплекс.

А вот ромбододекаэдр. Он замечательно проявлен на кристаллах алмадина из месторождений гг. Макзапах и Березовая в Зап. Кейвах на Кольском полуострове (рис. 3). Нравится вам это имя? Оно говорит о том, что у полиэдра 12 граней, все – ромбы. Эта элегантная форма легко запоминается студентами. А если отвлечься от метрических соотношений, то можно ли ее с чем-то спутать? Есть ли другие 12-эдры, у которых все грани 4-угольные? Оказывается, их 11 с разными симметриями [4, с. 520–521]: 2 №№ 1–3,  $m$  №№ 4–5,  $222$  № 6,  $mm2$  № 7,  $-3m$  № 8,  $-6m2$  № 9,  $-12 2m$  № 10,  $m3m$  № 11. По точечной группе симметрии  $m3m$  легко догадаться, что «наш» прячется под № 11. А вот пентагондодокаэдр, то есть, 12-эдр со всеми 5-угольными гра-



**Рис. 3.** Ромбододекаэдр идеальный (слева) и реальный в форме гранатов Зап. Кейв, Кольский полуостров (справа)

нями, уникален [4, с. 778, 782]. И все равно это плохое имя, поскольку не из него следуют единственность и устройство полиэдра.

Целый ряд кристаллических полиэдров носит «конструктивистские» имена, на-пример, пентагонтриоктаэдр, гексоктаэдр и тетрагексаэдр (рис. 4). У первого все грани – пентагоны, по 3 восстановленные над гранями октаэдрического каркаса. У второго все грани – треугольники, по 6 восстановленные над тем же каркасом. У третьего все грани – тоже треугольники, по 4 восстановленные над каркасом гексаэдра. Из второго и третьего имен выпало указание на треугольный характер граней. Их полные имена – тригонгексоктаэдр и тригонтetraгексаэдр. Предлагаю читателям самостоятельно убедиться в том, что и все не рассмотренные здесь кристаллические полиэдры служат ярлыками (ничего не говоря о строении полиэдра), указывают на элементы строения (чаще всего не однозначно) или способ устройства (где это наглядно). Это плохие имена, хотя и звучные, происходящие от греческих корней.

Как выглядят хорошие имена? Есть ли более рациональные способы именования выпуклых полиэдров? Есть, мы рассмотрим один из них. Для простоты представьте себе тетраэдр. Понумеруйте его вершины в любом по-

рядке цифрами от 1 до 4. Заполните матрицу  $4 \times 4$  единицами и нулями по правилу: если  $i$ -я и  $j$ -я вершины соединены ребром, то в положении  $(i, j)$  ставьте 1, иначе – 0. Ясно, что матрица симметрична относительно главной диагонали, на которой стоят нули. Она полностью задана верхним треугольником. Что получили для тетраэдра? Одни единицы! Выпишите их построчно – это и есть имя тетраэдра в двоичной системе счисления: 11111. В десятичной системе ему соответствует число 63.

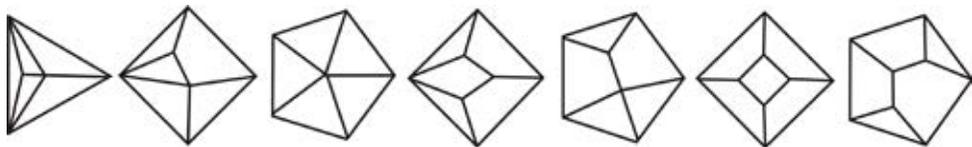


**Рис.4.** Слева направо: пентагонтриоктаэдр, гексоктаэдр и тетрагексаэдр

Из-за высокой симметрии тетраэдра и малого числа граней все способы нумерации его вершин дают одно и то же имя. Все остальные полиэдры допускают нумерации, приводящие к различным именам. Так, есть всего два комбинаторных типа выпуклых 5-эдров: 4-гранная пирамида и 3-гранная призма. У первой – 15 (507, 509, 510, 751, 759, 766, 863, 887, 893, 927, 943, 955, 990, 1005, 1011), у второй – 60 имен. Убедитесь в этом кропотливыми расчетами, чтобы оценить стоимость информации, заключенной в предыдущем предложении. Но какие имена выбрать? Естественно – самые простые, и тогда имя 4-гранной пирамиды – 507. Чтобы узнать имя 3-гранной призмы, не обязательно перебирать все нумерации вершин. Используя ее симметрию и свою смекалку, найдите такую нумерацию, чтобы в каждой строке матрицы единицы были смещены вправо... Задача сродни несложному кроссворду, а имя 3-гранной призмы – 7916. Предлагаю найти имена всех выпуклых 6-эдров (**рис. 5**). Первый нашедший их может получить у автора 10 \$.

Строгий порядок. Итак, выше предложен принцип номенклатуры выпуклых полиэдров на основании имен-чисел. Но ради чего мы именуем что бы то ни было? Только ли для того, чтобы, называя, указать на предмет? Могут ли нести имена другие функции? Давайте поговорим об этом.

Чем интересна предложенная номенклатура? Все выпуклые полиэдры именуется единообразно. Каждый получает имя, по которому однозначно восстанавливается переводом в двоичный код, заполнением матрицы и построением реберного графа. Рутинные процедуры можно поручить компьютеру. По именам все многообразие выпуклых полиэдров строго упорядочивается (в точном алгебраическом смысле) на числовой прямой. С ростом  $n$



**Рис. 5.** Все выпуклые 6-эдры

имена всех  $n$ -вершинников вкладываются в неперекрывающиеся интервалы, располагающиеся все правее. Отныне в мире выпуклых полиэдров – строгий порядок. Но самое главное я приберегу напоследок.

Сколько имен у комбинаторно асимметричного  $n$ -вершинника? Очевидно, все нумерации его вершин приводят к различным именам. Поэтому их  $n!$  – «эн факториал». На этом основании назовем их факториальными полиэдрами. В тот же миг симметричные полиэдры стали афакториальными. Приставка «а» – достойная компенсация за тысячелетия непризнания асимметричных форм. Наконец, большинство торжествует! А если серьезно, то введение «имени» полиэдра позволяет пересмотреть прежние понятия. Так, порядок группы автоморфизмов (характеристика, несколько более общая, чем точечная группа симметрий) есть  $n!$ , деленное на число его имен. Убедитесь в этом для тетраэдра, 4-гранной пирамиды и 3-гранной призмы. Просматриваются контуры и других теорем, но это уже специальная тема.

«Благодаря связи мира мыслей с вселенской гармонией, свод мыслей превращается сам собою в верное отображение и формулу вселенной. Но трудно искусство бес-страстного созерцания и творческого воззрения: исполнение требует непрерывного мышления, строгой трезвости, и наградою будет не одобрение современников, но одна только радость ведения и трезвления, сердечное соприкосновение со вселенной» [6, с. 45]. Интуиция, подкрепленная точным знанием из разных разделов науки, подсказывает мне, что «формулой» вселенной является асимметрия, которую надо определить позитивно, без отрицающего «а», что сделано выше на относительно простом примере выпуклых полиэдров. Овладеть асимметрией – вот достойная междисциплинарная проблема!

## Литература

1. Вернадский В.И. Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука. – 1965. – 364 с.
2. Вернадский В.И. Философские мысли натуралиста. М.: Наука. – 1988. – 520 с.
3. Спичак Г.И. Цитала. Украденный посох. Сыктывкар. – 2009. – 320 с.
4. Войтеховский Ю.Л., Степенищikov Д.Г. Комбинаторная кристалломорфология. Кн. IV: Выпуклые полиэдры. Т. I: 4- ... 12-эдры. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. – 2008. – 833 с.
5. Войтеховский Ю.Л., Степенищikov Д.Г. Комбинаторная кристалломорфология. Кн. IV: Выпуклые полиэдры. Т. II: Простые 13- ... 16-эдры. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. – 2008. – 828 с.
6. Новалис. Ученики в Саисе: магические романы и философические фрагменты. СПб.: Издательский дом «Леонардо». – 2011. – 352 с.

# Азиатская иммигрантка в Черном море

А.Р. Косьян

*Алиса Рубеновна Косьян,  
кандидат биологических наук,  
научный сотрудник Института  
проблем экологии и эволюции  
им. А.Н. Северцова РАН  
Проект РФФИ № 13-05-11508*

**Ш**ироко известный брюхоногий моллюск рапана [10], вселившийся в Черное море предположительно из Японского, в короткие сроки захватил всю его акваторию, а в последнее время распространился далеко за его пределы. Будучи крупным агрессивным хищником, у которого практически нет врагов и конкурентов, рапана наносит серьезный урон черноморским бентосным сообществам. Каковы причины такого удивительного успеха, каково влияние рапаны на местные биоценозы, чем объясняется необыкновенное морфологическое разнообразие моллюсков из разных точек побережья и как может помочь рапана в контроле состояния морской воды – на эти и другие вопросы пытается дать ответ эта статья.

Рапана [10], обнаруженная в районе Новороссийска в сороковых годах прошлого века [2], является одним из немногих видов моллюсков, который известен почти всем, побывавшим на Черноморском побережье (*рис.1 цветной вкладки*). Благодаря крупной живописной раковине, выгодно контрастирующей с невзрачными «туземными» ракушками, рапана стала его визитной карточкой и из-

любленным сувениром у туристов. Вкусовые качества моллюска также на высоте, и в меню многих курортных, а теперь и московских ресторанов можно найти блюда из мяса рапаны. В настоящее время черноморская рапана является одним из объектов квотируемого промысла.

Несмотря на столь весомые достоинства, рапана, будучи крупным и агрессивным хищником, воспринимается как нежелательный вселенец, способный серьезно ухудшить экологическую ситуацию. Довольно скоро рапана начала вытеснять аборигенную фауну, становясь доминантным видом донных сообществ, и нанесла серьезный урон устричным и мидиевым биоценозам. [5, 7]. Как же воспринимать ассимиляцию нового вида: как благо или как катастрофу? Давайте посмотрим, что нам известно об «обвиняемом»

### Распространение.

Исходный ареал *R. venosa* распространяется от Японского моря (Приморье) на севере, где рапана очень редка и до недавнего времени даже была занесена в местную Красную книгу, до южных провинций Китая, граничащих с Южно-Китайским морем [8]. Благодаря развитию морского судоходства и уникальным адаптивным возможностям, этот вид стал явлением глобального масштаба. Сейчас известно о существовании пяти репродуктивных популяций [3, 8]: азиатская, черноморско-средиземноморская, Чесапикского залива (атлантическое побережье США), северо-французская (Бретань) и уругвайско-аргентинская (эстуарий Рио де ла Плата). Имеются сведения о наличии *R. venosa* в Северном море, в штате Вашингтон (США) и даже у Новой Зеландии (единичные находки раковин).

### Последствия вселения рапаны в Черное море.

Попав в весьма комфортные условия, как по абиотическим характеристикам, так и по наличию кормовой базы, *R. venosa* быстро колонизировала бенталь Черного моря практически от уреза воды до глубины 70 м. Уникальность формирования черноморской популяции состоит в том, что в исходном ареале и в других новых районах ее расселение ограничено эстуариями рек и прилегающими распресненными участками морей. В Черном же море, имеющем низкую соленость, рапане оказался доступен весь набор биотопов верхней и средней части шельфа с различными по рельефу, грунтам, гидрохимии и гидрологии условиями. Разнообразны и объекты питания, основу которого составляют двустворчатые моллюски сердцевидки (*Cardiidae*), мидии (*Mytilidae*), устрицы (*Ostreidae*) и венерки (*Veneridae*). Несмотря на практически полное исчезновение одного из наиболее предпочитаемых объектов питания – устриц (*Ostrea edulis*), в котором рапана сыграла значительную роль, к 1990 г. черноморская популяция *R. venosa* находилась в стадии стабилизации. Однако в конце 1990-х-начале 2000-х гг. экологическая ситуация сложилась для рапаны неблагоприятно. Очень существенно была подорвана ее кормовая база, основу которой составляла мидия (*M. galloprovincialis*). Ранее широко распространенная в прибрежной зоне и на верхнем шельфе мидия исчезла на большей части прежнего ареала. Сохранились лишь некоторые поселения, в основном на банках на глубинах свыше 15 м. Вследствие гибели мидий, численность рапаны у берегов Крыма и

Кавказа также резко снизилась. В данном случае некоторые специалисты говорят о масштабной заморной ситуации, напоминающей эпи- или даже панзоотию [1]. Есть и другое объяснение [4]. В 1988 г., после вспышки численности нового черноморского вселенца, гребневика *Mnemiopsis leidyi*, началось заилиение мелководий южной части черноморского побережья. Этот процесс был связан как с общей эвтрофикацией Черного моря, так и с повышением количества взвешенного органического вещества после вселения мнемииопсиса. Резкое повышение мутности воды и сужение фотической зоны привели к деградации глубоководных ассоциаций растительности в южной части Северо-Кавказского побережья. В результате изреживания зарослей одного из наиболее массовых черноморских макрофитов – цистозеры (*Cystoseira barbata* и *C. crinita*), на твердых грунтах обнажились мидийные щетки. Это сделало их доступными для рапаны и спровоцировало вспышку ее численности сначала на скальных, а потом и на рыхлых грунтах. Кроме того, пелагические личинки наиболее массовых двустворчатых моллюсков активно выедались мнемииопсисом.

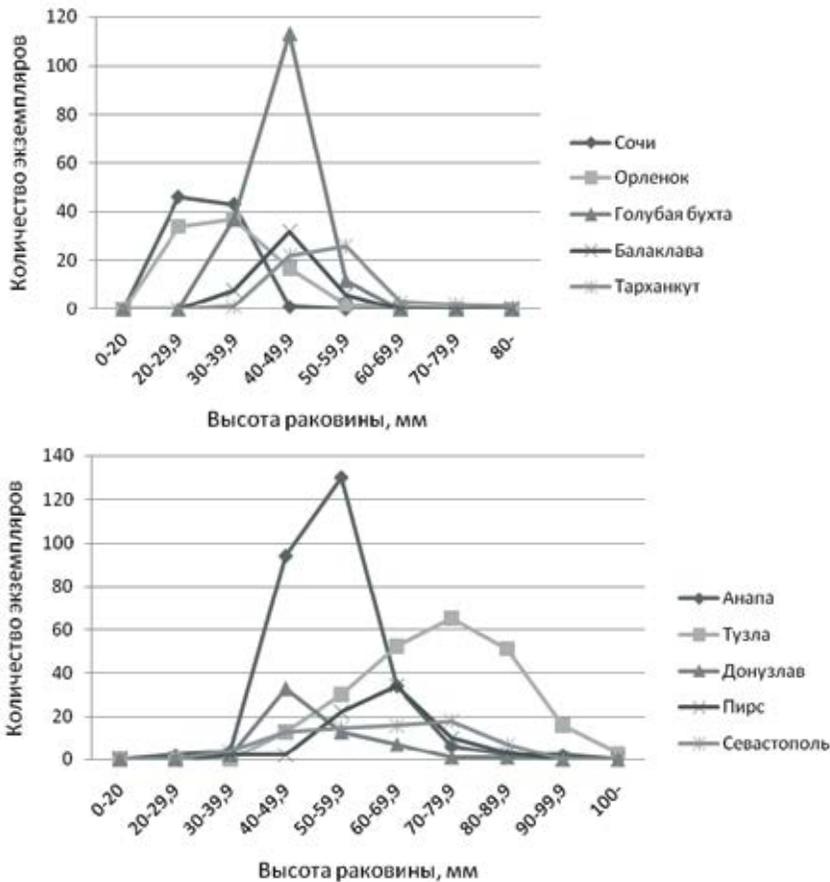
В 1998-1999 гг. в Черном море счастливым образом появился очередной экзотический вид – хищный гребневик *Beroe ovata*, в осенний период практически полностью уничтоживший мнемииопсиса. Это привело к первому за многие годы массовому оседанию молоди двустворчатых моллюсков в 1999 г. Поскольку на грунте отсутствовали взрослые моллюски, плотность осевшей молоди в 100-1000 раз превысила ранее наблюдавшиеся в зрелых сообществах концентрации сеголетков. Высокая плотность поселения осевшей молоди двустворчатых моллюсков обеспечила обширную кормовую базу для молоди рапаны, и плотность популяции последней в 2003 г. выросла в 10 раз. В результате исключительно высокая нагрузка хищника на сообщества двустворчатых моллюсков через год привела к падению их биомассы и очередным изменениям в видовой структуре. Выведенная из состояния равновесия экосистема начала испытывать резкие колебания как общих количественных показателей, так и видовой структуры, и не стабилизировалась до сих пор [4].

В северной части побережья, на Таманском полуострове и Анапской пересыпи, донные сообщества оказались значительно менее подвержены описанным изменениям, в связи с особенностями донного рельефа и характером осадков. Отсутствие скальных грунтов и мощных зарослей макрофитов позволило избежать первой вспышки численности рапаны, а процессы заиления, в связи с отсутствием значительного речного стока, протекали значительно менее интенсивно, чем в южной части побережья.

### **Размеры и скорость роста раковин.**

Сложившиеся пищевые условия привели к определенным изменениям морфологии рапаны. Главные тенденции ее развития в Черном море были предсказаны В.Д. Чухчиным на основе изучения Гудаутской устричной банки, подвергшейся разорению рапаной еще в 1950-е гг. [5]. Это замедление роста, уменьшение размеров особей и размеров, при которых наступает половозрелость.

Максимальный для *R. venosa* размер раковины 212,3 мм зафиксирован для исходной части ареала обитания [11]. По нашим данным (исследования поддержаны грантами РФФИ №№ 09\_05\_00707а и 12-05-00082а), средние размеры рапаны в



**Рис. 1.** Размерная структура выборок рапаны из разных мест сбора

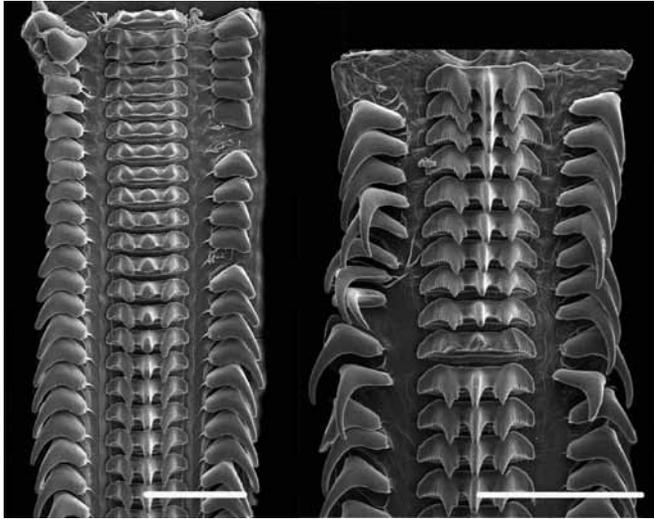
российском секторе Черного моря уменьшаются с севера на юг (*рис.2 цветной вкладки*). Самые крупные моллюски живут на песчаных грунтах Таманского полуострова, чуть мельче – в окрестностях Анапы, еще мельче – в Голубой бухте (Геленджик) и окрестностях Туапсе, самые мелкие моллюски собраны в Сочи (*рис.1*). Возрастной состав моллюсков приблизительно одинаков, а вот размеры раковины одновозрастных особей могут отличаться в несколько раз. Довольно часто такие моллюски встречаются в одной географической точке, что натолкнуло многих исследователей на мысль о том, что в популяции рапаны существует генетический полиморфизм, который в дальнейшем может привести к возникновению нескольких видов [1]. Однако наиболее вероятным нам представляется экологическое объяснение этого феномена. Определяющими морфологические модификации рапаны из различных биотопов Черного моря, географически удаленных и нет, являются качество и количество пищевых объектов. При этом группы особей, обитающие в одной географической точке и даже на грунтах одного

типа, могут иметь разные условия питания, что сказывается на скорости роста. Особенно важны эти условия в первые 1-2 года жизни, когда происходит наиболее интенсивный рост раковины. Например, три выборки из окрестностей небольшой Голубой бухты (1 – в центре бухты под пирсом на глубине 5–6 м, 2 – в открытом море на траверзе Голубой бухты на глубине 22–25 м и 3 – на выходе из бухты на глубине 15 м, расстояние между точками – около 800 м) показывают почти 100% статистическое различие по морфологическим признакам, несмотря на тесное соседство и несомненный генетический обмен. Но в первой точке сбора пищи рапана служат крупные мидии (с длиной створок до 6 см), во второй – мелкие мидии (до 3 см) и в третьей – мелкие венерки (1–1,5 см). Казалось бы, если пищи в избытке, то каким образом ее размер может влиять на скорость роста хищника? Не наелся – съешь еще! Но не все так просто. Крупных двустворок рапаны открывают мускульным усилием ноги. У более мелких они просверливают радулой отверстие в месте смыкания створок и затем выедают мясо жертвы. У многих моллюсков, питающихся мелкой добычей, зубы в передней рабочей части радулы стерты почти наполовину (*рис. 2*). На обработку как крупной, так и мелкой добычи тратится приблизительно одинаковое время (около суток), а вот питательных веществ из мелкой жертвы рапана получит существенно меньше. То есть, рапаны, вынужденные питаться мелкой, пусть даже и многочисленной, добычей постоянно недоедают, т.к. просто... не успевают наестся.

На скорость роста и развития также влияют травмы, полученные в результате нападения крупных крабов. Почти половина собранных нами раковин в Голубой бухте на глубине 15–25 м имела следы сколов, а некоторые – по два и даже по три таких следа. Это значит, что трижды за свою жизнь рапана подвергалась атаке краба, и каждый раз после этого ей приходилось восстанавливать раковину, а это очень энергозатратный процесс. Имеются данные о том, что даже наличие эпибионтов, животных, обитающих на поверхности раковины, а также истирание о грунт могут тормозить рост, что уж говорить о более существенных травмах.

## Возраст.

Помимо следов от травм, на раковинах рапаны в большинстве случаев хорошо видны другие, правильные линии, располагающиеся меридионально (*рис. 2*). Это так называемые нерестовые метки. В период размножения (в условиях Черного моря – май–октябрь) в физиологии моллюска происходят существенные перестройки, и раковина не растет, в результате чего на ней остается характерный след. Подсчитав число таких меток, можно узнать возраст ракушки, прибавив к ним еще два года – средний возраст наступления половозрелости. Самая старая найденная нами рапана прожила около 14 лет. Есть и другой, более трудоемкий и долгий способ определения возраста, который можно использовать в случае, если нерестовые метки на раковине не выражены: определение концентрации стабильных изотопов кислорода  $\delta^{18}\text{O}$  в разновозрастных приростах раковины. Дело в том, что концентрация изотопов зависит от температуры воды, и в холодное время года она выше, чем в теплое. Таким образом, взяв образцы карбоната из разных зон раковины, начиная от самых ранних и кончая самыми поздними, можно построить график содержания изотопов и по числу пиков на нем опре-



**Рис. 2** Радулы рапаны из Донузлава (слева) и Голубой бухты (справа). Предположительно рапана из Донузлава сверлила радулой створки жертвы, чтобы ее открыть, поэтому передние ряды зубов первой радулы сточены, а второй – нет. Длина масштабного отрезка 500 мкм

$^{13}\text{C}$ . Его концентрация в раковинах рапаны, собранных на большой глубине, меньше, чем в собранных на мелководье. В разных зонах прироста крышечки содержание этого изотопа также варьирует: в наиболее ранних слоях, сформированных молодым моллюском, изотопа меньше, чем в поздних, синтезированных взрослым животным. Как и в случае с кислородом, это свидетельствует о вертикальных миграциях в течение жизни: перемещении с глубины на мелководье.

### Размножение.

Рапаны, как и все брюхоногие моллюски отряда Neogastropoda, раздельнопопы. Самки часто отличаются от самцов размерами и цветом устья. Особенно хорошо это заметно в популяциях с неблагоприятными условиями питания, где самки особенно тяжело переносят энергетические затраты на нерест. Их размеры меньше, а устье имеет бледно-желтый или серый оттенок в отличие от ярко-оранжевого устья самцов. Различия в окраске устья могут быть обусловлены на порядок большим содержанием каротиноидов в гонадах самцов [1].

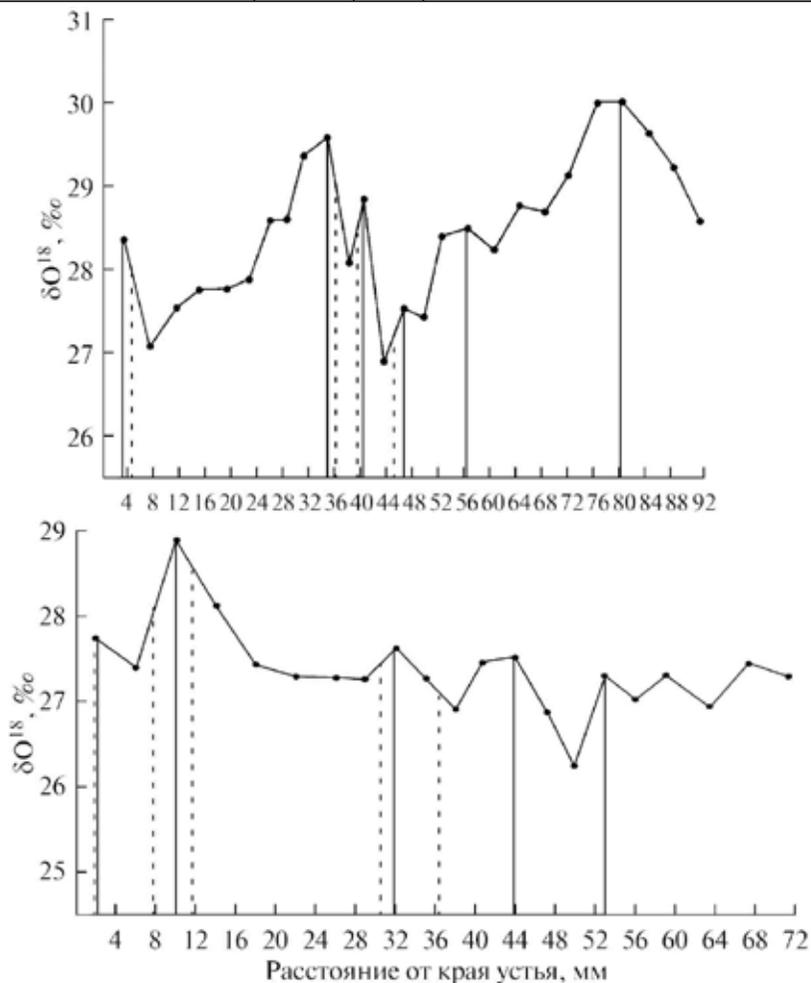
Через несколько недель после оплодотворения самки откладывают коконы на твердый субстрат (если его нет поблизости, то на раковины сородичей). Размер и количество коконов, а также число яиц в них напрямую зависит от размеров самки. Через месяц после откладывания рапанами яиц из коконов выходят велигеры – подвижные планктонные личинки, которые живут в толще воды от 1 до 4 недель, а потом оседают на дно [6].

Помимо самцов и самок, у рапаны обнаружены псевдогермафродиты (импосексы) – самки, у которых начинают развиваться мужские половые органы.

делить, сколько зим и сколько лет прожила ракушка (рис. 3).

Вертикальные миграции. На графике на рис. 3 видно также, что молодь рапаны живет в более холодной воде, чем взрослые особи. Это значит, что она обитает на большей глубине, чем взрослые: глубже 25 м температура воды в Черном море почти не подвержена перепадам и обычно держится на уровне 12–14 градусов.

С глубиной обитания морских животных связано содержание еще одного изотопа – углерода



**Рис. 3.** Сезонная динамика  $\delta^{18}\text{O}$  в раковинах рапаны с косы Тузла (верхний график) и из «Орленка» (нижний). Пунктиром показано расположение нерестовых меток, сплошными линиями – границы между годовыми приростами. Возраст обеих особей – 6 лет

Этот интересный феномен найден у целого ряда брюхоногих моллюсков и является реакцией на загрязнение воды трибутилоловом – одним из компонентов противообрастательных красок для судов. Это вещество похоже по составу на половой гормон, ответственный за развитие половых органов у самцов, и в результате загрязнения начинается аналогичный процесс у самок. В зависимости от уровня загрязнения выделяют несколько степеней развития мужских органов: на самой легкой стадии появляются только маленькие пенисы, в более тяжелом случае начинает развиваться семенной проток, который при дальнейшем развитии может закупорить женские половые пути и воспрепятствовать размножению – в этом случае самки становятся стерильными. У рапаны явление псевдогермафродитизма обнаружено в Южно-Китайском море и Чезапикском

заливе [9], в Черном море импосексы найдены у берегов Румынии [10], а также в Севастопольской и Голубой бухтах (наши данные). Интересно, что в Голубой бухте мы обнаружили импосексов только в сборах под пирсом, у которого стоят моторные лодки и катера; в других местах их не было. Обнаружение псевдогермафродитизма у рапаны в Черном море может дать толчок к развитию биомониторинга загрязнения прибрежных вод трибутилоловом и сходными веществами. Подобные программы уже на протяжении нескольких десятилетий действуют во многих развитых странах и привели к принятию ограничительных мер или полному запрету этих загрязняющих веществ.

Учитывая экологическую роль рапаны, необходимо постоянно контролировать все изменения в ее развитии и, отдавая должное красоте раковины, гастрономическим свойствам и выдающимся «достижениям» в расселении и адаптации, помнить, что это потенциально опасный для хрупкой экосистемы Черного моря чужеродный вид.

### Благодарность.

Работа поддержана грантами РФФИ №№ 09\_05\_00707а и 12-05-00082а

### Литература

1. Бондарев И.П. 2010 Морфогенез раковины и внутривидовая дифференциация рапаны *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846). *Ruthenica*, 20(2): 69-90.
2. Драпкин Е.И. 1953. Новый моллюск в Черном море. – *Природа*. – 9: 92–95.
3. Кантор Ю.И. 2003. Биологические и исторические тайны рапаны (*Rapana venosa*). *Природа*. – № 5: 32–34.
4. Чикина М.В. 2009. Макрозообентос рыхлых грунтов северо-кавказского побережья Черного моря: пространственная структура и многолетняя динамика. Автореферат диссертации кандидата биологических наук, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. – Москва. – 2009.
5. Чухчин В.Д. 1961. Рапана (*Rapana bezoar* L.) на Гудаутской устричной банке. Труды Севастопольской Биологической Станции. – 14: 178–187.
6. Чухчин В.Д. 1970. Функциональная морфология рапаны. – Киев. – Наукова думка. – 138 с.
7. Чухчин В.Д. 1984. Экология брюхоногих моллюсков Черного моря. – Киев. – Наукова думка. – 176 с.
8. ICES Cooperative Research Report No 264. 2004. Alien Species Alert: *Rapana venosa* (veined whelk). Prepared by Working Group on Introductions and Transfers of Marine Organisms. Edited by Mann R., Occhipinti A., Harding J.M. International Council for the Exploration of the Sea. Denmark, Copenhagen. 14 p.
9. Mann R., Harding J.M., Westcott E. 2006. Occurrence of imposex and seasonal patterns of hametogenesis in the invading veined rapa whelk *Rapana venosa* from Chesapeake Bay, USA. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 310: 129–138.
10. Micu S., Kelemen B., Mustata G. 2008. Current distribution and shell morphotypes of *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846) in the Agigea 4 m littoral. *Analele Stiintifice ale Universitatii "Al.I. Cuza" Iasi, s. Biologie animala*, 54: 185–189.
11. Pisor D.L. 2005. Registry of World Record Size Shells. Hackenheim, 86 pp.

# Как «карта» современного дерева может помочь палеоботанику

Н.П. Маслова

*Наталья Павловна Маслова, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории палеоботаники ПИН РАН. Научные интересы касаются морфологии, систематики и филогении цветковых растений. Н.П. Маслова была руководителем проекта РФФИ 07-04-00687-а «Систематика и филогения платаноидов и гаммелид на основе палеоботанических данных», в настоящее время руководит проектом 11-05-01104-а «Изменчивость морфологических и анатомических признаков ископаемых растений в свете решения проблем систематики, палеофлористики и палеоэкологии». Проект РФФИ № 13-05-11510*

Первоочередной задачей палеоботаника является определение ископаемых остатков растений. Отпечататься на камне могут целые листья или их фрагменты, побеги, соцветия, плоды, семена, кора и т.д. Сложность определения таких остатков заключается в том, что палеоботаник, как привило, имеет дело с отдельными разрозненными частями растения, по которым восстановить полное представление о существовавшем в прошлом растении сложно. Большое значение имеет форма сохранности ископаемого материала. Он может быть представлен отпечатками на породе, несущими лишь в разной степени информативные сведения об общей морфологии остатка, может иметь фитолеймы – углистые пленки, которые после определенных воздействий химикатами дополняют знания об анатомии, также остатки могут быть мумифицированы, и тогда мы имеем возможность получить более полные сведения об объемном строении объекта.

Итак, палеоботаники собрали коллекцию ископаемых растений. Перед нами большое число листовых остатков – отпечатков с фитолеймами и без них. Объекты фотографируем, делаем детальные рисунки, тщательно прорисовывая все самые

мелкие жилочки и зубчики края листа, по возможности изготавливаем препараты кутикулы (покровной пленки листа, отражающей клеточной строение самого верхнего слоя), начинаем сравнение и пытаемся понять, к какому же таксону отнести находки.

Остатки меловых платаноидных листьев обильно встречаются во флорах мелового периода. Внешне такие листья ничем не отличаются от листьев современного рода *Platanus*, в результате чего родилось ошибочное представление о раннем возникновении платана в геологической летописи. Эти листья, как правило, лопастные, с характерным жилкованием и краем листовой пластинки. При наличии ярко выраженных узнаваемых признаков палеоботаник легко может идентифицировать такие находки, а если встречаются какие-то, пусть даже не столь значительные, отличные от известной нормы признаки, то и описать новый таксон. При этом степень диагностической важности признака до последнего времени практически не учитывалась, что позволяло любое отклонение от известной нормы принимать за значимое и на его основании устанавливать новый таксон. В качестве такового мог представляться материал, в малой степени отличающийся по своей морфологии от уже известного науке. В результате число таксонов меловых платаноидных листьев, выделенных таким образом, неуклонно росло, а представления об истинном разнообразии платаноидов в историческом прошлом оказывались существенно искаженными.

Так как же палеоботанику определить степень значимости отдельных признаков или их комбинации? Одной из важнейших особенностей оценки таксономического веса признака является определение степени его изменчивости, представление об амплитуде его варьирования на разных онтогенетических стадиях и в различных условиях существования растения. Исследования такого рода помогают более успешно решить вопрос о степени генетической закрепленности того или иного признака. Еще в работах Н.И. Вавилова (1921, и др.) было показано, что знание границ изменчивости признака одного вида позволяет предвидеть существование определенной амплитуды варьирования того же признака у близкого вида путем его сопоставления с изученным материалом. Это особенно существенно для палеоботаники, где количество обрабатываемого материала часто ограничено, а его сохранность не всегда удовлетворительна. В случае с относительно молодыми ископаемыми находками (кайнозойскими и даже меловыми) на помощь приходит известный метод актуализма, с некоторой долей осторожности применяемый в палеонтологии. Следуя этому методологическому подходу, к пониманию прошлого идут через изучение современных процессов, что хорошо отражается в известном афоризме: «Изучение настоящего есть ключ к познанию прошлого».

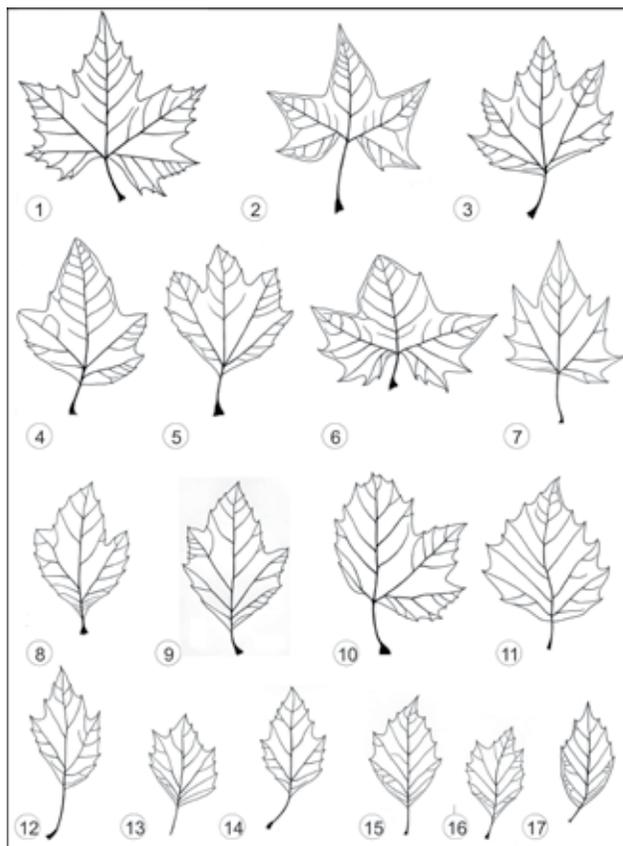
Определяя остатки меловых платаноидных листьев, мы решили методом сравнительно-морфологического анализа и с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) детально изучить морфологические характеристики и признаки эпидермы (покровного слоя органов растения)

---

\* См. Расцветаева Р.К. Дружба народов//Природа. 2010 №4. С. 51-56.

листьев современного вида *Platanus acerifolia* (синоним *P. hispanica*). Также была задача определить пределы изменчивости отдельных признаков листа с целью дальнейшего использования полученных данных в качестве модели при идентификации меловых находок листьев платанового облика (Маслова и др., 2008а, б и др.).

Основой для такого исследования послужил гербарный материал платана кленолистного (г. Анапа, Краснодарский край и г. Санта Кристина, Каталония, Испания). Листья собирались с одного дерева, делались масштабные фотографии кроны с целью выявления возможной приуроченности различных морфологических типов листьев к определенным участкам кроны, для всех выявленных морфотипов листьев исследовались кутикулярно-эпидермальные особенности.



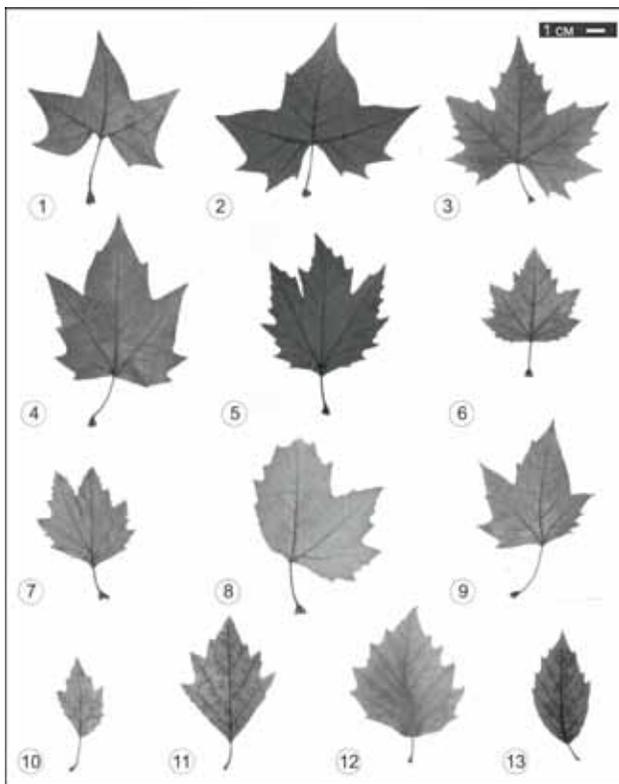
**Рис. 1.** Вариационный ряд изменчивости формы пластинки листьев, собранных с одного дерева платана кленолистного, без масштаба: 1 – 3 - пятилопастные листовые пластинки; 4, 5 - четырехлопастные листовые пластинки; 6 – 9 - трехлопастные листовые пластинки; 10 - асимметричные листовые пластинки; 11 – 17 - цельные листовые пластинки.

Первое, что бросается в глаза – удивительное разнообразие форм листовых пластинок. Как оказалось, вариационный ряд, составленный по форме листовой пластинки, у этого вида включает весь спектр форм, присущих роду *Platanus* в целом: лопастные с различной степенью развития лопастей, асимметричные (с лопастью, формирующейся только с одной стороны) и цельные листовые пластинки (рис. 1, 2). На рисунке 3 показана схема расположения («карта») отдельных морфотипов листьев в кроне *P. hispanica*. Представленная топография отдельных морфотипов, конечно, достаточно условна, но, тем не менее, со всей очевидностью она прослеживается как у исследованного платана из Каталонии, так и у анапского *P. acerifolia*. Анализ «карты» кроны

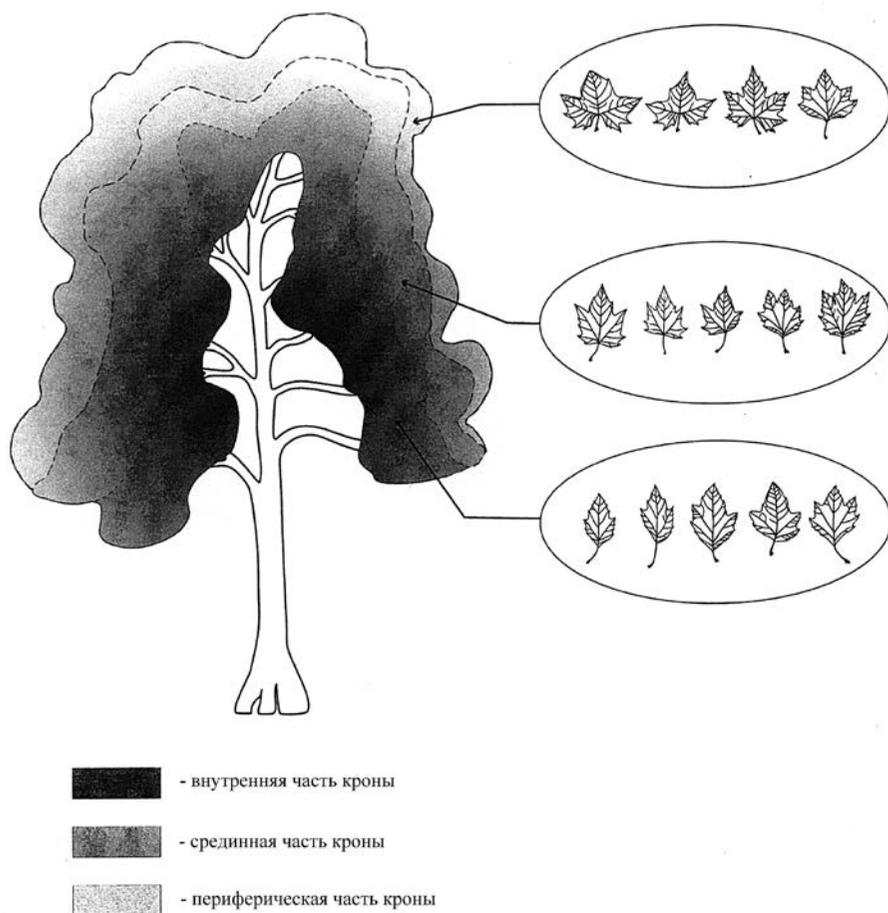
дерева позволил выявить приуроченность (1) лопастных листьев с различно развитыми лопастями, цельным или зубчатым краем, в основном, к периферии и центральной части кроны, (2) асимметричных листьев с лопастью, формирующейся только с одной стороны, преимущественно к внутренним участкам кроны, к центральным частям побегов и (3) цельных листьев исключительно к глубинным участкам кроны, как правило, к основаниям побегов. Следует отметить и существование группы листьев с переходными (смешанными) признаками морфологии и эпидермы.

Наиболее интересным фактом является наличие у платана кленолистного довольно существенного процента (около 10) цельных листьев, что в целом для современного *Platanus* не является характерным. Исключительно цельные листья имеет лишь один вид платана – *P. kerrii*, произрастающий во Вьетнаме и Лаосе, у других видов рода такие листья встречаются очень редко и, в основном, приурочены к прикорневым побегам (волчкам). У платана кленолистного цельные

лиственные пластинки имеются и на обычных побегах, их расположение приурочено к внутренним частям кроны дерева, большей частью в основаниях побегов. Как видно на фотографиях, иллюстрирующих процесс регенерации побегов из культуры клеток листьев *P. acerifolia in vitro* (Liu, Bao, 2003, fig.1, p. 643), первыми появляются именно цельные листья и остаются единственным морфотипом на побегах даже после формирования корневой системы. Появление первых типично лопастных листьев отмечено только через 6 месяцев, при перенесении растений в грунт. Еще К. Шаффер (*Schäffer, 1895*) отмечал сходство базальных листьев годовичного побега с первыми молодыми листьями тех



**Рис. 2.** Лопастные [1 - 6], асимметричные [7 - 9] и цельные [10 - 13] листовые пластинки платана кленолистного, собранные с одного дерева. Масштабная линейка 1 см.



**Рис.3.** Схема расположения морфотипов листьев в кроне дерева платана кленолистного [по Маслова и др., 2008а с изменениями].

же растений. Согласно идее Шаффера, каждый годичный побег в процессе формообразования как бы повторяет ряд листьев, образуемых всем растением в онтогенезе.

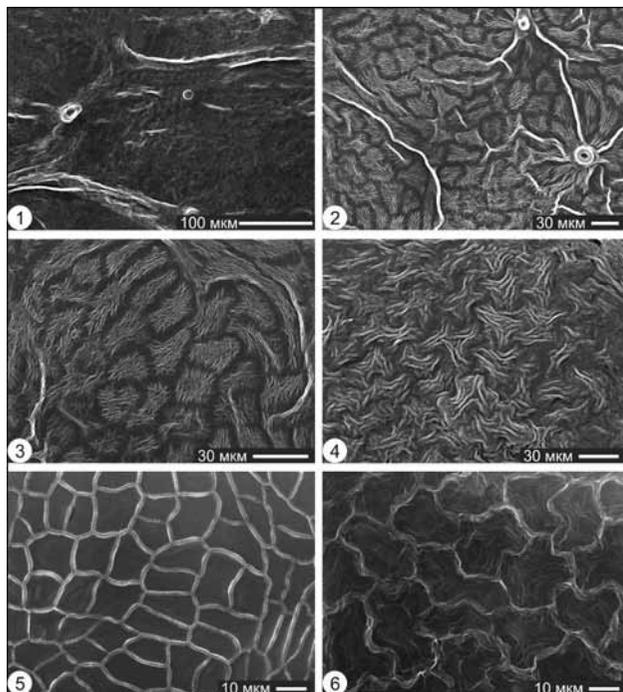
Как оказалось в случае с платаном кленолистным, вариабельность формы листовых пластинок в пределах одной особи проявляется как на побегах текущего года, так и на многолетних, а также на обычных и прикорневых побегах (волчках). Причем спектр форм пластинок листа в общих чертах по-

вторяется на различных типах побегов, несколько отличаясь в зависимости от расположения самого побега в кроне дерева.

Наряду с формой листовой пластинки значительно варьируют и другие признаки строения листа – форма основания пластинки, число, размер, форма зубцов края, степень развития и порядок отхождения жилок различного порядка. Кроме того, листья, расположенные по периферии и внутри кроны значительно различаются по своей текстуре. Невооруженным глазом определяется более выраженная толщина пластинки у листьев, расположенных по периферии кроны. Эти листья имеют также более плотные листовые пластинки с относительно более мощно развитыми жилками, сильно выраженным опушением, формирующим у листьев, расположенных на вершине побега, густой «войлочный» покров. Листья, развивающиеся внутри кроны, имеют тонкую, подобную бумаге текстуру, тонкую сеть жилкования.

Разные участки кроны дерева (центральная и периферическая части), характеризуются неодинаковой степенью освещенности, нагрева, воздействия воздушных потоков. Кроме этого, листья разных высотных ярусов находятся в неодинаковых условиях водоснабжения ввиду того, что поступление воды в верхние ярусы затруднено в связи с необходимостью преодоления растением силы тяжести. Таким образом, существующие горизонтальный и вертикальный градиенты экологических факторов определяют разнообразие макроморфологических и микроструктурных признаков листьев в кроне одного растения. Древесное растение с объемной кроной вынуждено приспосабливаться к разнородным микроклиматическим условиям, в которых оказываются его различные органы. В самой общей форме это наблюдение было сделано на древесных растениях уже более века назад русским ученым В.Р. Заленским (1904), однако, оно было неоправданно предано забвению. Идея Заленского заключается в том, что верхние листья крупных растений имеют, в целом, более ксероморфный характер, чем срединные и, тем более, нижние листья. Размерные характеристики зрелых листьев одного дерева в целом также подчиняются этому закону – более крупные пластинки имеют листья, расположенные в основании и центральной части побегов, более мелкие – на верхушке побега. Таким образом, многие признаки морфологии у листьев одного дерева оказываются зависимыми от местоположения их в кроне, от условий, в которых они развиваются.

Рисунки 1 и 2 демонстрируют полное разнообразие форм пластинок листьев современного кленолистного платана, собранных с одного (!) дерева. Теперь представим ситуацию, когда такие листья могли бы быть найдены в одном местонахождении ископаемой флоры. Безусловно, без знания пределов изменчивости признаков есть опасность отнесения таких находок не только к разным родам, но и даже семействам! В то же время, типичные для платана лопастные листья (ведь они тоже разные!) в этом случае можно было бы определить разными видами или родами платаноидов. Представление о таксономическом разнообразии данного местонахождения ископаемой флоры будет при этом, конечно, далеким от истинного. Лишь восстановление полного вариационного ряда морфологических признаков листа может спо-



**Рис.4.** Кутикулярный покров и эпидерма верхней поверхности листьев платана кленолистного., СЭМ: 1 - кутикула листовая пластинки светового листа с вершины побега, границы клеток не отчетливые; 2 - кутикула листовая пластинки теневого листа, границы клеток отчетливые, видны мелкие кутикулярные складки на стенках клеток; 3 - основные клетки эпидермы светового листа, антиклинальные стенки клеток прямые или слабо изогнутые; 4 - эпидерма теневого листа, антиклинальные стенки клеток волнистые; 5 - основные клетки эпидермы светового листа, антиклинальные стенки прямые или слабо изогнутые; 6 - основные клетки эпидермы теневого листа, антиклинальные стенки волнистые.

До недавнего времени подобные сведения были достаточно фрагментарны, а подчас и противоречивы. Как показывает анализ опубликованных данных, зачастую палеоботаниками при выделении новых родов и видов во внимание принимаются количественные и размерные характеристики эпидермальных структур, что скорее обуславливается экологическими и микроклиматическими особенностями листьев. Более того, как правило, палеоботаник ограничен в возможностях выбора фитолейм для анализа в силу сохранности ископаемых

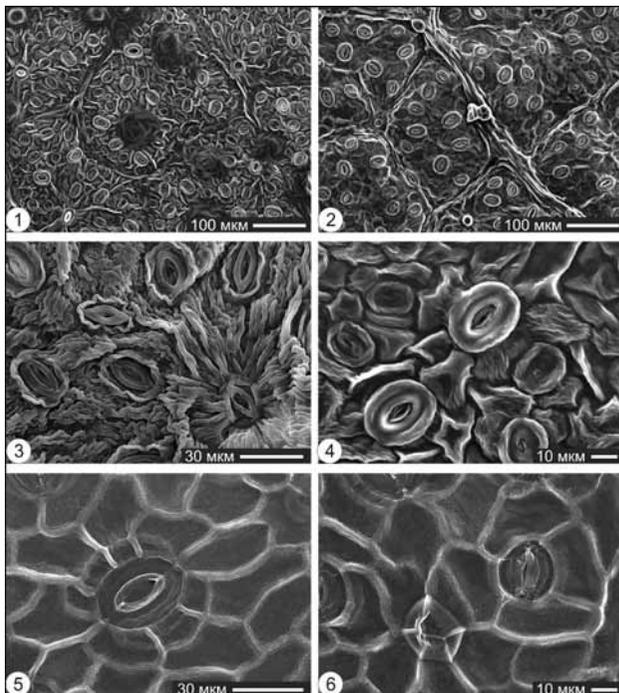
собствовать объединению этих находок в один вид. Анализ морфологии листа современного платана показывает, что ни один из его морфологических признаков не является уникальным и определяющим при установлении родовой принадлежности такого рода листьев. Чем больше разнообразных признаков привлекается к идентификации ископаемого материала, тем с большей достоверностью могут быть определены находки.

Как за спасательный круг палеоботаник хватается за любую возможность изучения признаков анатомии у ископаемых растений. Ведь, может быть, именно эти признаки позволят ему разделить находки на отдельные виды! Использование кутикулярно-эпидермальных данных для более точной диагностики ископаемого листового материала требует более полного знания пределов индивидуальной изменчивости этих признаков.

находок. Часто приходится довольствоваться имеющимся материалом без учета, например, топографии изучаемого фрагмента листа, что, как показано на современном материале (Заленский, 1904 и др.), имеет большое значение – эпидерма центральной части листовой пластинки может отличаться по количественным и размерным характеристикам эпидермальных структур от краевой эпидермы. Такие данные получены нами и для мелового вида *Ettingshausenia kubaensis* (Maslova et al., 2011).

Нам удалось установить, что листья платана кленолистного имеют разную степень толщины покрывающей их пленки (кутикулы), а также несколько различающееся анатомическое строение покровного слоя клеток – эпидермы (рис. 4). Наиболее развитой кутикулой характеризуются мелкие лопастные листья с плотной, грубой текстурой, сосредоточенные на вершине побегов в верхней части кроны, у которых, в свою очередь, кутикула более толстая

на верхней поверхности листа. Очертания стенок клеток эпидермы у таких листьев практически не просматриваются. Такой мощный покров с множеством кроющихся волосков надежно защищает лист от воздействия палящего солнца и горячих ветряных потоков. Самая тонкая кутикула отмечена на нижней поверхности листа цельных листьев, расположенных в глубине кроны, где солнечная активность меньше, а ветряные потоки не так ощутимы.



**Рис. 5.** Эпидерма нижней поверхности листьев платана кленолистного, СЭМ: 1 - эпидерма светового листа, видны часто расположенные устьица и основания железистых трихом; 2 - эпидерма теневого листа, видны реже, чем у световых листьев, расположенные устьица и основания кроющихся трихом; 3 - эпидерма теневого листа, видна складчатая кутикула, устьица, у которых замыкающие клетки не подняты над поверхностью кутикулы; 4 эпидерма теневого листа, видны разные по размерам устьица с замыкающими клетками, образующими поднятые над поверхностью кутикулы валики; 5 - эпидерма светового листа, латероцитное устьице; 6 - эпидерма теневого листа, аномоцитное устьице и основание трихома, развитое на нескольких клетках.

Все изученные нами морфотипы листьев платана в целом характеризуются единым общим планом строения эпидермы, однако, выявляются и некоторые отличия (рис. 4, 5). Они касаются таких признаков, как различная степень извилистости и толщина стенок основных клеток эпидермы, тип и диаметр оснований трихом (волосков), степень и тип складчатости кутикулы нижней и верхней поверхностей листовой пластинки. Также наблюдаются вариации в размерных и количественных характеристиках различных эпидермальных структур – например, размеры устьиц, диаметр оснований трихом, число основных клеток эпидермы и плотность устьиц на единицу поверхности листа и др. Эти отличия обуславливаются местоположением листа в кроне дерева. Условно выделяются две группы – световые и теневые листья – достаточно различающиеся по кутикулярно-эпидермальным признакам. Также наблюдаются переходные между этими группами формы, которые имеют смешанные признаки двух групп. Группу типичных световых составляют листья, располагающиеся на вершине побегов и по периферии кроны, типичные теневые листья располагаются в центральной части и в глубине кроны. Разное расположение листьев в кроне крупного дерева предусматривает воздействие на них различных микроклиматических условий, и, как следствие, вариации в строении защитной ткани листьев. Кроме этого, у листьев с одного дерева мы наблюдаем вариации в организации устьичных аппаратов (особо организованной группы клеток эпидермы, выполняющих функцию дыхания) листьев платана кленолистного.

Исследованиями Ж. Апчерча (*Upchurch, 1984*) было показано, что характерные для семейства платановых кутикулярно-эпидермальные признаки сформировались уже в альбе (около 99 – 112 млн. лет назад). Среди них отмечаются такие основные признаки, как преимущественно аномоцитный тип устьичного аппарата, радиально расходящиеся от устьиц и оснований трихом кутикулярные складки, присутствие наряду с кроющими и железистых трихом, развитие трихом на одной или нескольких клетках. Эти признаки достаточно уверенно определяют принадлежность исследуемого таксона этому семейству. Такие признаки, как форма и размер основных клеток эпидермы и устьиц, а также степень волнистости антиклинальных клеточных стенок имеют достаточно широкие пределы варьирования в зависимости от условий развития листа. Поэтому сравнение видов (современных и ископаемых) только по этим признакам является сомнительным, приводящим к некорректным заключениям.

Таким образом, как и при исследовании общей морфологии листьев в пределах одного дерева отмечается значительная варибельность признаков строения покровной ткани листа. Приложение этих данных к проблемам палеоботаники дает основание задуматься о правомерности отнесения ископаемых находок листьев к разным таксонам только на основании, например, степени извилистости антиклинальных стенок эпидермальных клеток или типа организации устьиц. Не всегда хорошая сохранность материала и доступность исследования анатомических признаков ископаемых листьев как раз и побуждает палеоботаника ограничиваться имеющимися фрагментарными данными и придавать им весомый таксономический статус. Такой подход только увеличивает число родов, диагностические признаки которых в значительной мере перекрываются. Возникающая при этом таксономиче-

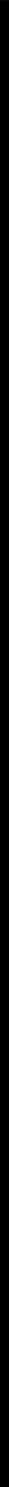
ская «инфляция» не способствует пониманию истинного таксономического разнообразия платановых в геологическом прошлом.

Как подсказывает нам «карта» современного платана, листья одного дерева могут демонстрировать множественные вариации признаков морфологии и анатомии. Так как же следует действовать палеоботанику, исследуя имеющийся у него ископаемый листовой материал?

Изучение вариационных рядов листовых признаков (морфологических и кутикулярно-эпидермальных) у платана кленолистного выявило принадлежность различных морфотипов листьев одному виду, в то время как взятые по отдельности эти листья могли бы быть отнесены к различным родам и даже семействам. Учитывая сказанное, можно заключить, что решение вопроса о таксономической принадлежности ископаемых находок должно быть основано на детальном изучении изменчивости макроморфологических признаков на обширных моноотпных (из одного местонахождения, одного слоя породы) выборках с привлечением микроструктурных исследований. Также совершенно необходимым является использование представлений о пределах варьирования морфологических и эпидермальных признаков листьев близких современных аналогов, что в той или иной мере позволит избежать необоснованного выделения новых родов по листьям на основании комбинаций известных признаков.

## Литература

1. Вавилов Н.И. Закон гомологических рядов и наследственной изменчивости // Сельское и лесное хозяйство. 1921. № 1 – 3. С. 84 – 89.
2. Заленский В.Р. Материалы к количественной анатомии различных листьев одних и тех же растений // Изв. Киевск. Политехн. Инст. Т. 4. 1904. 209 с.
3. Маслова Н.П., Волкова Л.Д., Горденко Н.В. Морфологическая изменчивость листьев *Platanus acerifolia* Willd. (Platanaceae) и подходы к определению меловых дисперсных листьев платанового облика // Ботан. журн. 2008. Т. 93. № 6. С. 825-839.
4. Маслова Н.П., Горденко Н.В., Волкова Л.Д. Особенности строения эпидермы листьев *Platanus acerifolia* Willd. (Platanaceae) и значение кутикулярного анализа для определения меловых листьев платанового облика // Ботан. журн. 2008. Т. 93. № 7. С. 982 – 995.
5. Liu G., Bao M. Adventitious shoot regeneration from in vitro cultured leaves of London plane tree (*Platanus acerifolia* Willd.) // Plant Cell Rep. 2003. V. 21 (7). P. 640 – 644.
6. Maslova N.P., Tekleva M.V., Sokolova A.B., Broushkin A.V., Gordenko N.V. Infructescences of *Friisicarpus kubaensis* sp. nov. and leaves of *Ettingshausenia kubaensis* sp. nov. from the Albian-Cenomanian of Chulym-Yenisei depression, Russia // Palaeobotanist. 2011. V. 60. № 2. P. 209-236.
7. Schäffer C. Über die Verwendbarkeit des Laubblattes der heute lebenden Pflanzen zu phylogenetischen Untersuchungen. Abhandl. Gebiete Naturwiss. Hamburg: L. Friedrichsen & co., 1895. P. 1 – 40.
8. Upchurch G.R. Cuticle evolution in Early Cretaceous angiosperms from the Potomac Group of Virginia and Maryland // Ann. Mo. Bot. Gard. 1984. V. 71. P. 522 – 550.



**ЕСТЕСТВЕННОНАУЧНЫЕ  
МЕТОДЫ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
В ГУМАНИТАРНЫХ  
НАУКАХ**

# Моногород в представлениях жителей: между открытостью и безопасностью

Н.В. Веселкова, Е.В.Прямикова, М.Н. Вандышев

*Вандышев Михаил Николаевич, кандидат социальных наук, доцент кафедры теории и истории социологии Института социальных и политических наук Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. г. Екатеринбург,*

*Веселкова Наталья Вадимовна, кандидат социальных наук, доцент кафедры прикладной социологии Института социальных и политических наук Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. г. Екатеринбург*

*Прямикова Елена Викторовна, доктор социальных наук, доцент кафедры теоретической и прикладной социологии Института фундаментального социально-гуманитарного образования Уральского государственного педагогического университета, г. Екатеринбург  
Проект РФФИ № 13-06-11505*

Преодолена ли в российском социально-экономическом развитии логика «осадного положения», предопределившая, по мнению М. Кастельса [4], проигрыш советской системы в глобальном соревновании? Каковы перспективы развития российского креативного класса, прозрачной надежды всего современного мира? На уровне городов «осадному положению» противоположна открытость, именно она является залогом (необходимым, хотя и не достаточным условием) разворачивания 3 «Т» успешного развития: технологий, таланта, толерантности [6].

Российские моногорода, пожалуй, являются средоточием рудиментарной осадности и аккумулируют, порой гипертрофированно, все обозначенные коллизии. В настоящей статье мы представляем свои размышления по этим вопросам, опираясь на материалы исследования «Динамика практик и стратегий жизнеобеспечения населения моногородов» (грант РФФИ и Правительства Свердловской области, №10-06-96021, 2010–2012 гг.), в ходе которого изучались монопоселения Свердловской области. Эмпирическую базу проекта соста-

вили данные, собранные с помощью ряда методов: телефонный опрос населения (в Асбесте, Первоуральске, Краснотурьинске, Североуральске, закрытом городе Лесном,  $n=295$ ), полуформализованные экспертные интервью с жителями моногородов, представляющими разные социальные слои, виды и сферы деятельности, групповые дискуссии, ментальные карты, на которых участники исследования рисовали свои города. В качестве источников информации использовались также материалы официальных сайтов министерств и муниципалитетов, публикации СМИ и интернет-форумов изучаемых городов (с 1995 по 2011 гг.), региональных и федеральных изданий. Таким образом, использованы принципы методологической, методической, источниковой и отчасти временной триангуляции.

Разделяя тезис о том, что «развитие городов все в большей мере начинает определяться индивидуальными жизненными стратегиями населяющих его людей» [1], мы обращаемся к представлениям жителей изучаемых моногородов.

«Города по самой своей сути открыты», подчеркивают авторы одного из трудов по урбанистике в русле пространственного поворота [8, р.2]. Эта идея остается центральной со времен классических исследований города рубежа XIX–XX вв. Тогда же возникла и массированная критика городов как средоточия пороков и угроз индустриального общества [см., напр., 9]. Открытость и гетерогенность, подтверждают современные ученые, – это то, что город должен обеспечивать, и одновременно источник постоянных напряжений и вызовов [8].

Созданные как города-заводы при месторождениях полезных ископаемых и энергоносителях, уральские монопоселения в период Великой Отечественной войны вынужденно развивали самообеспечение продовольствием, второй толчок прошел под флагом брежневской продовольственной программы: практически каждое крупное предприятие имело свои сельхозугодья и подсобные хозяйства, получили распространение и индивидуальные наделы. Тем самым достигалась автономия жизнеобеспечения, город мог функционировать как самодостаточное образование. Если учесть, что с давних времен многие поселения вне европейской части Российской империи намеренно закладывались в глухих местах, дабы шивать и держать территорию, а в советское время не последним доводом при выборе места под секретное производство была его удаленность от «цивилизации», прибавить сюда состояние путей сообщения, то картина «осадного положения» уральских моногородов станет весьма впечатляющей.

В наиболее концентрированном виде это качество воспроизводится закрытыми территориальными образованиями (ЗАО), на ментальных картах оно обозначается в виде КПП и колючей проволоки, в которую упирается дорога извне (*рис. 1*).

Открытость или закрытость – само по себе не хорошо и не плохо, с точки зрения нашего подхода важно, как жители оценивают эти характеристики. Из истории Краснотурьинска, Нижнего Тагила и других моногородов известно, что многие из тех, кто были туда депортированы с началом войны, насильно удерживались и принуждались к труду (их силами в значительной степени возведены предприятия и сами города), получив свободу передви-

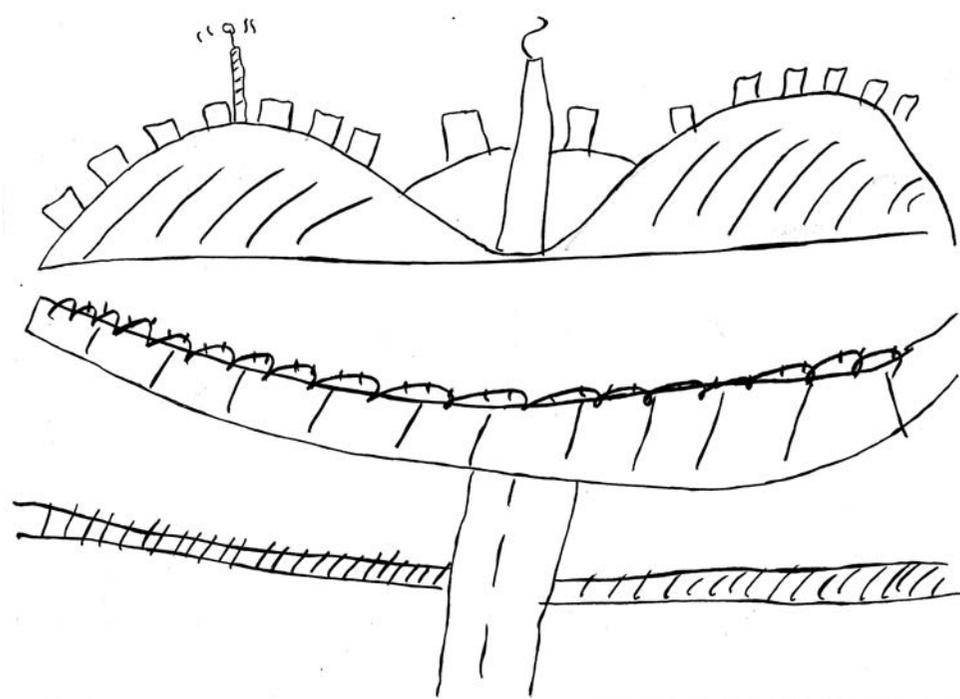


Рис. 1. Ментальная карта г. Новоуральск (M24H)<sup>1</sup>

жения в 1956 г., пожелали там остаться. Причины и обстоятельства неоднозначны, но можно констатировать формирование сильной привязанности к месту, которое актуально и для текущей ситуации.

В отсутствие сравнительных данных можно предположить, что в моногородах чувство места, локальная идентичность и привязанность, доходящая до зависимости, не сильнее, чем в городах других типов, но артикулируется тем интенсивнее и своеобразнее, чем более проблематичной становится дальнейшая судьба города. Так, в Асбесте эти процессы усилились на фоне антиасбестовой кампании [2], в Краснотурьинске – проблем с градообразующим предприятием БАЗ в 2011 г., Нижний Тагил обыграл символику рукавицы человека труда и танка, по-своему включившись в волну протестной активности в 2011–2012 гг.

Несмотря на распространенность критических настроений, моногорода продуцируют довольно высокий уровень идентификации, которую сами жители называют «патриотизмом»:

*«каждый честный человек, выросший в этом городе, не имеет никакого права уйти с земли, на которой стоит завод»* (Иван Ответ #93 – 26.10.2011) .

*«У Вас хоть какое-то чувство патриотизма есть? Свалить можно когда угодно! А ты попробуй спасти то, что тебе дорого! Я горжусь, что*

<sup>1</sup> Легенда: первая буква означает пол информанта, цифры – возраст, заключительная буква – город (А – Асбест, К – Качканар, Л – Лесной, НТ – Нижний Тагил).

*родилась в этом городе! Я понимаю, что я одна ничего не решу, но как Вы не поймете, что победу в ВОВ одержала вся страна объединившись!»* (Ксюша Ответ #189 – 28.10.2011).

*«Люди надеялись на будущее! У меня вот, например, дед всю жизнь отработал в электролизном, отец 21 год уже там работает, и я мечтал там всю жизнь работать (мне на самом деле нравится там и не из-за того, что денег нормально платят), а получилось всего полгода»* (batman Ответ #244 – 08.11.2011)<sup>2</sup>

Патриотизм нашел свое выражение и в таком интересном факте, как стремление оценивать положение дел в своем городе выше, чем в каких-то других (мол, у нас еще не так плохо, у других еще хуже). Эксперт из Асбеста полагает, что в его городе «среднероссийский уровень» доходов, от других городов области не отличается, «может, даже где-то и получше» (М49А). По мнению информанта из Краснотурьинска, в этом городе положение дел лучше, чем в соседних: «У нас тут в 30 км Серов, в 5 км г. Карпинск. Сразу видно, как едешь на автомобиле, пересечешь границу города... У нас лучше, люди работают, город красивый, фонтаны, площадь, стадион. Придешь на работу устраиваться, до 70% из того же Карпинска у нас работают. У них там работать особо негде» (М28Кр).

Позитивная идентичность должна чем-то питаться. Неплохим ресурсом здесь оказывается недавнее прошлое города, которое героизируется и романтизируется не только в официальном дискурсе, но и в обыденном. Так, в молодом Качканаре сакральна фигура Первостроителя, причем она встречается и в позитивном контексте, как, например, при подготовке к празднованию в 2012 г. 55-летия города [7], и в негативном:

*«Обидно за город. Как удержат молодежь, чем? А ничем – просто нужно уезжать. Если не самим, то детей своих настраивать на отъезд. ... Представляю, как обидно читать это первостроителям, которые положили свое здоровье, молодость, силы на этот город. А кто-то его вот так просто возьмет и погубит, ни за что»* (Тимур 12.05.11, комментарий к статье «Город понесет потери в медицине» // Качканарский рабочий 12.05.11 <http://www.ikar-kch.ru/?p=7104>).

Достоинством моногорода жители зачастую считают его компактность («езде можно быстро успеть») (Ж22Л) и безопасность, даруемые удаленностью от больших центров. Развитая сеть образовательных и спортивных учреждений и низкая цена жилья делают такие города привлекательными для молодых семей с детьми. Если в ЗАТО Новоуральск оставить режим секретности только по контуру комбината, а Асбесту форсировать транспортное сообщение с Екатеринбургом и другими центрами, эти моногорода станут более открытыми. Однако вместе с открытостью придут и ухудшение криминогенной обстановки, безопасности дорожного движения и прочие угрозы – такие опасения сегодня существуют у некоторой части «патриотов» моногородов.

<sup>2</sup>Здесь и далее приводятся «ответы» участников обсуждения темы «БАЗ - снова закрывают, слухи и не только» на Краснотурьинском городском форуме <http://forum.krasnoturinsk.org/cgi-bin/yabb2/YaBB.pl?num=1318833796/all>

Самые главные факторы, которые определяют положение дел в городе, по мнению опрошенных, это уровень дохода и состояние досуговой сферы. Респонденты отмечают, что за последние 10 лет заметно улучшилась сфера торговли. Другие сферы в среднем продемонстрировали нулевую или отрицательную динамику.

Такая оценка изменений косвенно свидетельствует об отсутствии точек роста. Вместе с тем, сама история создания моногородов как будто обеспечивает им креативный класс:

*«Население активно вообще, в городе Качканаре оно нетипичное, оно, я считаю, более активное и более подвижное, ... более способно реагировать на какие-то раздражители ... более быстро, более емко, чем в целом по области. ... у нас просто генофонд такой, кто у нас тут поселился? Это же стройка ... комсомольская была, поэтому приезжали молодые комсомольцы, активисты и ээки были, а потом радиозавод построили, когда хорошие кадры электронщиков со всей страны приезжали сюда, и вот эта вот смесь бурная порождает что-то уникальное» (M50K).*

В действительности все эти, казалось бы, «правильные» условия не приводят к взрыву креатива, напротив, одним из последних исследований Качканар отнесен к числу «угасающих промышленных центров» среди «слабеющих территорий» [3, с. 10–13]; именно в этой терминологии была сформулирована оценка и в нашем проекте: *«Эти города уже все затухают; убивают потихоньку, уничтожают» (Ж58К)*. Работает система пылесосов: субстоличные и столичные города, через посредство менее статусных, вытягивают из территорий все соки. Но тогда почему средние и малые города, в том числе, и монопрофильные, столь сильно различаются по уровню благосостояния? В моногородах на первый план выходит фактор успешности градообразующего предприятия (фактически блокируя иные объяснительные модели). Теперь уже это предприятие гарантированно засасывает все виды ресурсов, включая человеческий капитал и предпринимательство: *«малый бизнес, который есть в Нижнем Тагиле, он, конечно же, работает на эти [крупные промышленные] предприятия и рядом с этими предприятиями» (M51HT)*.

Во всех обследованных моногородах существует проблема оттока молодежи и сложности с привлечением кадров (мы касались этого в [2, с. 215]). Заводы разрабатывают хитрые программы финансирования обучения, которые частично помогают в закреплении молодежи. В Качканар возвращаются в основном *«на комбинат, кто выучился по программам комбината, а так – очень мало. Поэтому в городе кадровая проблема во всех сферах и на всех предприятиях, лучшие всех в этом отношении ГОК – они могут привлечь, купить нужных им специалистов, там уровень развития предприятия и зарплаты позволяют это делать»*; эксперт видит проблему в невозможности привлечь *«квалифицированных опытных специалистов»* в другие сферы: *«нам нечего им пообещать из того, что есть в больших городах, выучить своих – сложно, нет четких механизмов и программ удержания кадров, также и в других многих сферах» (M50K)*.

*«Квалифицированные специалисты» в российском понимании и «креативный класс»* – не одно и то же, во всяком случае, далеко не всегда. В отечествен-

ном научном и общественно-политическом дискурсе (еще?) не утвердилось убеждение, что «креативность является фундаментальной составляющей успешного развития городов» [5], и в нашем исследовании не встречалось упоминаний креативного класса, хотя некоторые высказывания были близки. Молодежь, специалисты поедут в эти города и захотят там остаться, когда креативный класс сделает эти места открытыми и разнообразными – открытыми к разнообразию, приветствующими и привлекающими его, – что, очевидно, противоположно любой «мононости». Откуда же взять креативный класс? Похоже, таковыми должны стать ныне живущие там люди, только так можно разорвать замкнутый круг, в который свернулась колея path dependency моногородов.

Думается, главным системным препятствием для разворачивания креативности выступает патернализм. В обследованных моногородах он имеет скорее общероссийский характер – упование на власти (именно этот институт набрал наибольшее число голосов среди всех коллективных факторов, определяющих жизнь в городе, так ответили 42% участников телефонного опроса), при этом влияние властей оценивается преимущественно отрицательно.

*«Да плевать всем верхам, что с моногородом случится и как мы будем жить. ... Завод-то с 41 года, естественно, он от старости рушится, если его не модернизировать. Беда моногородов в том, что все зависит от одного предприятия, и в этом по сути тоже вина властей, что моногородам уделяла мало внимания»* (Т.А. Ответ #86 - 26.10.2011).

Градообразующее предприятие в качестве источника влияния против ожиданий назвали всего 9% (зато здесь половина оценок – положительные). Хорошая новость – 20% опрошенных считают, что состояние дел зависит от самих горожан; плохая – только каждый пятый из них оценивает это влияние положительно, более половины – отрицательно. Общественные организации, малый бизнес в качестве агентов влияния набрали по 3–4 голоса из 295 (около 1%).

Таким образом, наибольшую опасность для моногорода представляет его самозамкнутость. Согласно концепции Р. Флориды, индустриальность города прямо противоположна креативности, но, похоже, американский исследователь не имел дела с российскими моногородами. Согласно нашему определению, моногород – это социально-территориальное поселение городского типа, характеризующееся узко отраслевым рынком профессиональной занятости населения и высокой степенью зависимости структур жизнеобеспечения от градообразующего предприятия (или нескольких предприятий, объединенных технологической цепочкой или относящихся к одной отрасли экономики). Инерция патернализма и осадности здесь наиболее сильна, эффект колеи воспроизводится как в менталитете, так и практиках горожан.

## Литература

1. Вендина О. Можно ли увидеть четкие перспективы в туманном будущем городов? // «Неприкосновенный запас». – 2010. – № 2 (70) <http://magazines.russ.ru/nz/2010/2/ve26-pr.html>.
2. Веселкова Н., Прямикова Е., Вандышев М. Моногород: дилеммы конструирования пространства // Топос. – 2011. – № 1. – С. 208–224.

3. *Жога Г.В., Толмачев Д.Е., Алейникова И.С., Кадочников С.М., Кузнецов П.Д., Полоцкая Л.М.* Анализ территориальной, возрастной и образовательной структуры трудовых ресурсов Свердловской области в среднесрочной и долгосрочной перспективе. Отчет о научно-исследовательской работе. – Екатеринбург, 2012.
4. *Кастельс М.* Информационная эпоха: экономика, общество и культура / Пер. с англ. под науч. ред. О.И. Шкаратана. – М.: ГУ ВШЭ, 2000. – 608 с.
5. Лекция «Между контролем и творчеством: роль художника в создании «креативного города» // ЦНСИ [http://www.cisr.ru/news\\_343.html](http://www.cisr.ru/news_343.html)
6. *Флорида Р.* Креативный класс: люди, которые меняют будущее / Пер. с англ. А. Константинова. – М. : Классика-XXI, 2005. – 421 с.
7. 55-летие Качканара // Качканарский городской округ. Официальный сайт. [http://admkgor.ru/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=155&Itemid=438](http://admkgor.ru/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=155&Itemid=438).
8. *City Worlds* / Ed. by D. Massey, J. Allen, and S. Pile. London ; New York : Routledge in association with the Open University, 1999. 185 p.
9. *Merrifield A.* The Dialectics of Dystopia: Disorder and Zero Tolerance in The City // *International Journal of Urban and Regional Research*. – 2000. – Vol. 24, № 2. – P. 473–489.

# Образование как основа экономики знаний<sup>1</sup>

С.А. Панов, Е.А. Пахомова, А.В. Пахомов

*Панов Станислав Аврорович, доктор технических наук, профессор, академик РАЕН, заведующий кафедрой экономики университета «Дубна». Область научных интересов – проблемы экономики транспорта.*

*Пахомова Елена Анатольевна, доктор экономических наук, кандидат технических наук, доцент по кафедре экономики, заместитель заведующего кафедрой экономики университета «Дубна». Область научных интересов – моделирование экономических процессов с целью анализа и прогнозирования.*

*Пахомов Александр Вячеславович, кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики университета «Дубна», заместитель директора по экономике ОАО «Научно-производственный комплекс «Дедал» (г. Дубна Московской области). Область научных интересов – экономический анализ предприятий, экономическая безопасность. Проект РФФИ № 13-06-11507\_1*

В этой статье представлены обобщенные содержательные результаты исследования «Методологические и инструментальные основы оценки влияния вуза наукограда на эффективность регионального развития»<sup>2</sup>.

Проблема темпов роста экономики – это проблема ее стратегического развития, для решения которой нужна программа развития, в том числе, отраслей-«локомотивов», среди которых – преимущественное развитие экономики знаний как катализатора научно-технического прогресса, т.е. образования и науки<sup>3</sup>. Этот тезис может быть дополнен результатами исследования по этой теме [6, 10, 7, 8].

Экономика знаний, или «экономика, базирующаяся на знаниях» – тип экономики, в которой производство знаний является источником роста экономики. По мнению ряда экспертов, в наши дни происходит становление нового экономического строя, основой и главной ценностью которого являются знания.

<sup>1</sup> Статья подготовлена по результатам выполнения проекта «Методологические и инструментальные основы оценки влияния вуза наукограда на эффективность регионального развития», поддержанного РФФИ, проект № 12-06-00180-а, номер государственной регистрации НИР – 01201268209.

<sup>2</sup> Исследование, в рамках которого подготовлена статья, проводится при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-06-00180 а).

<sup>3</sup> Доклад академика А.Г.Аганбегяна на заседании совместного Научно-экспертного совета по антикризисной политике Аналитического управления Аппарата Государственной Думы по теме «Кадровое обеспечение модернизации российской экономики» 25 ноября 2011.

Интересно, что о ценности знаний говорил еще в XVII в. английский экономист У. Петти: «Один час занятия ремеслом, обучение которому потребовало десять лет труда, может содержать в себе больше труда, чем работа в течение месяца в каком-нибудь обычном занятии, не требующем обучения».

В этом контексте использование инвестиций в образовании для ускорения социально-экономического развития страны должно иметь постоянный характер, а сфера профессионального образования должна рассматриваться как приоритетная, развиваться ускоренными темпами по сравнению с темпами роста экономики, чтобы быть «локомотивом» развития экономики. Об этом, например, свидетельствует опыт большинства зарубежных стран после второй мировой войны, Америки конца XIX в. и в течение всего XX в.: развитие образования способно помочь преодолению переходных / кризисных периодов.

Таким образом, можно сформулировать *принцип опережающей функции образования* – для того, чтобы образование играло роль локомотива экономического развития, необходимо, чтобы темпы развития образования превышали темпы развития экономики, т.е. срабатывал эффект типа «рычага».

Обоснование сути этого утверждения мы находим в работах доктора экономических наук, профессора Уральского Государственного Технического университета И.А. Майбурова [5]. В случае, если эти темпы равны, то образование, обеспечивая потребности экономики в квалифицированных кадрах, утрачивает свою стратегическую миссию. Какое-то время предложение системы образования будет соответствовать потребностям экономики. В последующем при такой образовательной политике государства неизбежно постепенное нарастание деградиционных процессов сначала в самой системе образования, а затем и в обществе. В конечном счете система образования превратится в простую «кузницу» кадров, в своеобразный «сырьевой придаток» для экономики. Качество подготовки кадров будет падать, и в результате экономика переориентируется на специалистов, получивших квалификацию у зарубежных образовательных провайдеров. Спрос на специалистов, подготовленных отечественной системой образования, будет уменьшаться, что повлечет за собой дальнейшее сокращение финансирования системы образования, как следствие – потерю конкурентоспособности и утрату социальной функции системы образования. В результате само существование государства как самостоятельного и независимого будет под вопросом, что происходит сейчас, например, в большинстве стран африканского континента.

Кстати, к иллюстрации принципа опережающей функции к науке может быть дан тезис профессора С.П. Капицы о том, что от момента научных разработок до их внедрения проходит порядка сотни лет [13]. Яркий пример – законы электродинамики Максвелла XIX в. и бум электронной техники конца XX–начала XXI вв.

Вернемся к принципу опережающей функции образования. В современных условиях России этот тезис может быть применен не только на макро-, но и на мезо- (региональном) уровне, поскольку в условиях недостатка государственного финансирования регионы вынуждены во многом самостоятельно заботиться о своем социально-экономическом развитии, осуществлять самостоятельную экономическую деятельность; мезоуровень – ядро

экономики, поэтому «интеграционные и трансформационные процессы ...» должны проходить «через организационно-структурные преобразования в «среднем» звене экономики, то есть, в мезоэкономике».

В работе проводилось исследование состояния системы высшего профессионального образования (ВПО) и среднего профессионального образования (СПО) для 29 регионов России за 2002–2006 гг. разными методами: методом координатного диагностирования и методом определения эластичности образовательно-экономического леввериджа (по дискретной и эконометрической методикам); при этом под эластичностью образовательно-экономического леввериджа понималась эластичность интегральных образовательных показателей по интегральным экономическим показателям.

Опережающей функции образования на исследуемом временном интервале по выбранным регионам в целом не наблюдается ни по ВПО, ни по СПО. Что касается СПО, с учетом современных исследований в этой области, подобный результат можно расценить как тревожную тенденцию, означающую недостаточный приток в экономику специалистов со средним профессиональным образованием, «являющихся востребованными во всех областях экономики и составляющими в настоящее время около трети занятого населения страны».

Проводя параллели между результатами исследования и современными исследованиями по кластеризации экономического пространства России, следует отметить, что связность не только экономического, но и образовательного пространства России очень мала. Для того, чтобы управлять разнородным пространством, развивать его, необходимо прежде всего понимать его, т.е. строить региональную политику с учетом особенностей выделенных территорий. Для этого нужны квалифицированные кадры, отвечающие современным потребностям общества. Например, в экономическо-управленческих науках это, по нашему мнению, должны быть специалисты, имеющие комплексное образование с междисциплинарными компонентами, базирующееся на фундаментальных нравственных ценностях [9].

Прецизионное внимание к результатам, полученным разными методами, в данном случае оказывается хотя и необходимым с исследовательской точки зрения, но с содержательной точки зрения подобно излишней точности вычисления, поскольку корректность применяемого инструментария не отразилась на основном выводе относительно исследуемых объектов, а именно: все используемые методы говорят об отсутствии в целом в России опережающей функции образования. А на этом фоне вопрос различия состояний ВПО и СПО созвучен формулировке «чье состояние хуже: ВПО или СПО».

Другими словами, и достаточно простые методы, коими являются используемые методы, могут «уловить» проблемы, если они есть. Или, как говорит математическая статистика, если событие не случайно, то оно обязательно себя проявит. Значит, проблемы образования в России настолько серьезны и обширны, что улавливаются даже грубым детектором, как ни горько это признать.

Особенно остро воспринимается этот вывод в сравнении с принципиальной особенностью образовательной политики большинства стран, прежде

всего, США, начиная с 60-х гг. XX в., где приоритетность финансирования образовательной системы была признана сферой национальных интересов. Основными побудительными мотивами тому послужили внушительные успехи СССР в области ядерных технологий, космических исследований, а также советская система образования. Причем, США не собираются останавливаться на достигнутом, даже несмотря на условия нынешнего финансово-экономического кризиса, объявив о намерениях удвоить финансирование науки и образования.

Поэтому переход России от декларируемого уровня приоритетности развития образования к его реальному развитию путем достойного финансирования образования (возможно, в разных регионах государственная поддержка должна быть разной) – одна из прямых и первостепенных задач российского государства.

На проблему финансирования образования можно смотреть и с точки зрения индивидуума – вложений в человеческий капитал (кадры). С другой стороны, академик В.М. Полтерович обратил внимание, что в условиях современной России является ошибкой заимствовать передовые технологии развитых стран [14]. Перефразируя этот тезис, можно сказать, что является ошибкой и проводить расчетный анализ по методикам, пригодным для развитых стран. Приведем пример из нашего исследования. В этой части были проведены расчеты на основе принципа равенства доходностей инвестиций государства и отдельного человека в образование по Московской области за 2007–2009 гг., сравнены с аналогичными расчетами доктора экономических наук, профессора И.А. Майбурова по Уральскому региону, что дало следующий результат: с ростом уровня образования наблюдается рост выгоды частных вложений. Однако этот вывод является не столь однозначным, каким кажется на первый взгляд.

Этот вывод находится в согласии с современной концепцией развития человеческого капитала, перенацеливающей общество на повышение качества и длительности жизни человека, когда богатством общества становится универсально развитый социум, в противовес традиционным теориям экономического развития, ставящим конечную цель в виде повышения валового внутреннего продукта. Согласно этой концепции, человек перестает восприниматься как производительная сила и субъект производственных отношений, становится конечной целью социально-экономического развития общества, а «ядром доктрины «прорыва» должна быть ставка на интеллект нации».

Из этого следует не только обоснование оценок эффективности накопления, инвестирования и использования человеческого капитала в экономике и промышленности России, с чем имеет дело теория человеческого капитала и что, бесспорно, немаловажно, но и возникает вопрос: как создать такие условия, разработать такую гибкую систему финансирования, чтобы частные вложения стали возможными, а их источники (заемные средства) – доступными человеку для вложений в образование?

При этом важным становится вопрос внедрения системы бюджетного субсидирования человека в процесс получения им высшего образования так,

чтобы соблюсти баланс интересов государства, образовательного учреждения и студента, т.е. сформировать оптимальную систему финансирования образования, которая будет выгодна как студенту, так и вузу и государству.

Вместе с тем просматриваются прикладные аспекты, требующие конкретизации и дальнейшей проработки, как-то: определение источников государственной части финансирования образования, рассмотрение вариантов предоставления заемных средств студенту, разработка методов кредитования (лаг, процентная ставка, срок кредита, обеспечение).

Актуальность исследований проблем образования, вложений в человеческий капитал, или, отходя от формальностей научного стиля, в человека, в создание условий для его развития, для России представляется особенно важным. Здесь требуются дополнительные пояснения.

Дело в том, что реформы 90-х гг. XX в. в России внесли ощутимые, зачастую болезненные изменения в социально-экономический уклад нашей жизни. Начавшись в политической и экономической областях, изменения неминуемо затронули идеологию и культуру, взаимоотношения между людьми. Личность оказалась в какой-то мере незащищенной, неподготовленной перед необходимостью адаптации в новых условиях, необходимостью изменения менталитета, или несколько переиначивая слова из доклада академика В.М. Полтеровича, не получила компенсации как проигравшая. А поскольку формирование личности возложено традиционно на образование, то перед последним встала поистине исполинская задача – обеспечить комплексную подготовку личности, способной успешно работать и комфортно себя чувствовать в новых условиях. Понятие «комфорт» многогранно, однако основными составляющими, обеспечивающими комфортные условия существования человеку, представляются следующие.

Человек, кем бы он ни был по профессии: ученым, врачом, инженером, рабочим – существо несчастное в том смысле, что обременено потребностями. Ему нужны материальные блага, жизненные удобства, немаловажно и общественное признание (не только хлеба, но и зрелищ), другими словами, достойное место в общей системе социально-экономических отношений. Причем наличие этих составляющих в современных условиях цивилизации невозможно без знаний, без образования, а их отсутствие приводит к печальным, даже катастрофическим последствиям. Поясним: нереализованная, не нашедшая свое место в жизни личность выплескивает свое неудовлетворение в виде агрессии в общество, проявляющейся в виде негативных социальных явлений – алкоголизма, наркомании, суицида, преступности, терроризма и т.д.

Таким образом, экономические потрясения влекут за собой потрясения культурные. Последствия последних наиболее чудовищны, поскольку начинают проявляться со значительным временным лагом на подросшем поколении. Тем более тревожным для нашего общества в целом, для исследователей, причастных к проблемам образования, для преподавательского состава всех уровней образования должно становиться осознание того, что по прошествии полутора десятка лет социально-экономических потрясений (глубокое расслоение населения по уровню жизни, ухудшение состояния здоровья людей, высокая смертность, деформация системы образования

и социальной защиты, рост преступности) мы начинаем пожирать плоды – трудности работы с нынешним молодым поколением, на которое пришелся удар культурных потрясений. Это, в свою очередь, должно становиться мощным стимулом для исследований в области образования, вложений в человеческий капитал, в том числе, в адаптацию методик преподавания в современных условиях.

Поясним нашу мысль с привлечением концепции социального конструирования реальности Питера Бергера и Томаса Лукмана [1]. Согласно этой концепции, люди из разных социальных слоев воспринимают по-разному реальность. Поэтому возникает актуальная задача понять, каким образом человек получает знание об окружающей его социальной среде, что это знание собой представляет и как в дальнейшем это знание влияет на изменение структуры этой среды. Ребенок, входящий в жизнь, осваивает общепринятые способы взаимодействия с физической и социальной реальностью в ходе процесса под названием социализация, которую можно разделить на первичную и вторичную. Первичная социализация есть та первая социализация, которой индивид подвергается в детстве и благодаря которой становится членом общества. Вторичная социализация – это каждый последующий процесс, позволяющий уже социализированному индивиду входить в новые сектора объективного мира его общества.

Первичная социализация наиболее важна для индивида, особенно в силу того, что любая вторичная социализация осуществляется на ее основе и во многом повторяет или частично копирует ее структуру. За первичную социализацию индивида, т.е. за процесс передачи (а значит, модификации) ему социального мира, ответственны другие. Ответственность эта усугубляется тем, что разрушение массивной, основополагающей реальности, принятой в детстве, способно вызывать у индивида сильнейший шок. Это означает, что если государство будет создавать различные условия для детей в период их первичной социализации в глобальном масштабе (города, региона, страны) путем недофинансирования полного среднего образования, то уже в недалеком будущем мы можем получить несмешивающиеся социальные слои, что явится глубинной бомбой возможного социального взрыва.

Подобным примером в истории России является период после революции 1917 г. до сороковых годов XX в. В 1920–30-е гг. социальные слои еще не смешивались, вследствие чего социальный антагонизм был обострен и, можно сказать, подпитывал репрессивную машину. Однако сороковые годы перемешали общество и, соответственно, уменьшили социальные противоречия [3]. В настоящее время уже раздаются предостережения о возможном классовом разделении общества, в котором дети изначально будут иметь разные стартовые условия для дальнейшей жизни. А закончив школу, они окажутся в несмешиваемых социальных средах. У них будет колоссальная разница в образовании, в представлениях о жизни. И мы получим идеальные условия для социального взрыва [4]. Об этих «расколах», «разломах» в обществе, с которыми нужно бороться, говорил в своем докладе профессор Г.Б. Клейнер [15].

К сожалению, ярким диссонансом, усиливающим эти «расколы», является все более укрепляющееся мнение о необходимости распространения

сверхдорогих образовательных программ, априори доступных только малой части общества. С одной стороны, по словам Г.Б. Клейнера, на одну из групп общества – менеджмент предприятий – возлагается миссия модернизации народного хозяйства. Сейчас эта группа находится между собственником и совестью. С другой стороны, вряд ли можно ожидать, что этот разлом может быть устранен только хорошим дорогим образованием менеджеров, смотрящих снисходительно на тех, у кого нет средств на оплату подобного дорогого обучения. Не зря в научном мире все чаще говорится о разделении понятий образования и обучения. Образование – это обучение плюс формирование вектора нравственности.

Интересным кажется тот факт, что идей нравственности пронизаны научные разработки по оценке эффективности инвестиционных проектов Института Системного Анализа РАН под руководством заслуженного деятеля науки РФ профессора В.Н. Лившица, в которых большое значение уделяется оценке именно общественной эффективности как первому этапу оценки проекта, а сам проект, согласно методическим рекомендациям, должен немедленно отвергаться при отрицательной общественной эффективности [2]. Может, не было бы столь драматических социально-экономических изменений в нашем обществе в последние двадцать лет, если бы этот принцип широко использовался, и не только в инвестиционном проектировании?

Может, с этих позиций должна осуществляться вся хозяйственная деятельность человека, в том числе, в области образования? С позиций, заставляющих человека осознать, сколь велик по замыслу и масштабам созидательный труд предшествующих поколений. И не только осознать, а проникнуться мыслью о необходимости беречь все созданное до него и в своей будущей деятельности – на каком бы уровне иерархии она ни происходила – руководствоваться простой по своей форме, но совсем не тривиальной по претворению в жизнь христианской формулой: «Не навреди...».

## Литература

1. Баксанский О.Е., Гнатик Е.Н., Кучер Е.Н. Естествознание: Современные когнитивные концепции: Учебное пособие / Под общ. и научн. ред. В.Р. Ириной. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 224 с. – С. 62–71.
2. Виленский П.Л., Лившиц В.Н., Смоляк С.А. Оценка эффективности инвестиционных проектов: Теория и практика: учеб. пособие – 4-е изд., перераб. и доп.. – М.: «Дело» АНХ, 2008. – 1104 с.
3. Головкина И.В. (Римская-Корсакова) Побезденные: Роман. – М.: МП «Русло», 1993. – 733 с. – С. 177.
4. Соловьев В. «Мы оказались у разбитого корыта» // Аргументы и факты № 4. – 2010. – С. 9.
5. Майбуров И.А. Парадигма согласованного развития высшей школы и промышленности в регионе // Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2003. – 516 с.
6. Панов С.А., Пахомов А.В., Пахомова Е.А. Мальцина Л.Г. Титова И.М. Исследование взаимовлияния социально-экономического состояния Московской области и университета «Дубна» непараметрическими методами // Аудит и финансовый анализ. – 2011, №5. – С. 114–121.

7. *Панов С.А., Пахомов А.В., Пахомова Е.А. Солодова Е.Н.* Метод координатного диагностирования для сравнительного анализа социально-экономического развития наукоградов (на примере наукоградов Дубна Московской области и Обнинск Калужской области) // Национальные интересы: приоритеты и безопасность, № 8(149) – 2012 февраль. С. 16–30.
8. *Панов С.А., Пахомов А.В., Пахомова Е.А. Крупнева Ю.В.* Методический подход к оценке влияния вуза на социально-экономическое развитие региона // Региональная экономика: теория и практика, № 6 (237) – 2012 январь. – С. 2–14.
9. *Панов С.А., Пахомова Е.А.* Какой должна быть подготовка современного экономиста // Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна» № 2 (11), октябрь 2004. – С. 27–36.
10. *Пахомова Е.А.* Методологические и инструментальные основы оценки влияния вуза наукограда на эффективность регионального развития. – Saarbrücken (Germany): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 424 с.
11. <http://www.duma.gov.ru/news/273/112283/> – Официальный сайт Государственной Думы / Официально: 25 ноября состоялось совместное заседание...
12. <http://iam.duma.gov.ru/node/5/4900> – Официальный сайт Государственной Думы / «XIX Кондратьевские чтения. Модернизация российской экономики: уроки, риски, шансы» 20 октября 2011 г.
13. <http://www.tvkultura.ru/issue.html?id=92127> – Стенограмма 2-й лекции С. П. Капицы на телеканале «Культура» в рамках проекта «ACADEMIA» 20.04.2010.
14. <http://www.duma.gov.ru/news/273/112283> – Докладакадемика В.М. Полтеровича на совместном заседании Научно-экспертного совета по антикризисной политике Аналитического управления Аппарата Государственной Думы по теме «Кадровое обеспечение модернизации российской экономики» 25 ноября 2011 г..
15. <http://iam.duma.gov.ru/node/5/4900> – Доклад члена-корреспондента РАН Г.Б. Клейнера на совместном заседании Научно-экспертного совета по антикризисной политике Аналитического управления Аппарата Государственной Думы по теме «Кадровое обеспечение модернизации российской экономики» 25 ноября 2011 г.

# Особенности наименования человека в мифологических рассказах, или Как зовут покойника?

В.А. Черванёва

*В.А. Черванёва,  
кандидат филологических наук,  
Воронежский государственный педагогический университет, доцент  
Проект РФФИ № 13-06-11509*

Тема смерти всегда привлекала внимание человека своей неотвратимостью, загадочностью, ореолом тайны. С одной стороны, это обуславливало табуирование данной тематики в повседневной коммуникации, с другой стороны, вызывало реакцию противоположную – желание обсудить тему, чтобы осмыслить и объяснить это явление, а также выплеснуть эмоции, снять психологическое напряжение.

Не случайно смерть, как ключевой момент человеческой жизни, в наивном сознании мифологизируется, т.е. подвергается осмыслению и интерпретации, основанной не на рациональных доказательствах, а на вере и убеждениях, предписанных культурной традицией, религиозной или идеологической системой [1], и это находит широкое отражение в фольклоре.

В народных славянских традициях чрезвычайно распространены тексты «загробной» тематики, в частности, рассказы о покойниках, которые и после смерти не «успокаиваются», а продолжают активно действовать в мире живых. Проявляют такие персонажи себя по-разному, в основном они вступают в общение с теми людьми, с которыми при жизни

у них была наиболее тесная эмоциональная связь. Основные сюжетные линии таких рассказов сводятся к следующим:

муж-покойник приходит к своей оставшейся в живых жене, вступает в

- супружеские отношения, мучит ее или наоборот, помогает по хозяйству, предсказывает будущее:

*У одной женщины умер муж. Он к ней ходил. Она его блинами кормила. Она печет блины до полуночи. Печет, печет, а блины все исчезают. А молодуха уронила ножик, специально. Стала подымать и видит ноги мохнатые. Она говорит: «Господи, помилуй!». Он и исчез. А потом голос его слышит: «Догадалась», мол, а так была бы она задушена (Чер. №23)<sup>1</sup> ;*

- умершая мать приходит и кормит детей грудью, купает и т.п., в результате чего они начинают болеть и умирают:

*Померла у одного мужика жена. Двое ребят осталось. И вот она ночью придет, берет девочнок, наливает воды и купает. И так каждую ночь. А ж замыла детей, они такие худенькие стали (Зин., №386);*

- погибший жених пытается забрать свою невесту к себе в могилу (Зин., №392-394);

- покойник является родственникам и упрекает их за то, что его «неправильно» похоронили (не в той одежде или обуви, что-то забыли положить в гроб) и просит устранить этот беспорядок, например, передать ему обувь, деньги или что-то еще «на тот свет»:

*Похоронила жена мужа. А он ей снится ночью да снится. Она и в церковь, а он все снится. Тогда она во сне спросила у него: «Что ты мне снишься, окаянный?». А он ей ответил, что снится, потому что она в гроб его обула в маленькие тапки, и что тогда-то тогда-то и там-то там-то на хуторе будут похороны, и чтоб она положила в гроб хорошие тапки. Она так сделала, и он перестал ейниться (Воронеж., №547).*

Кроме того, сам факт видимого или слышимого явления мифологического персонажа-покойника уже достаточно значим для того, чтобы об этом рассказать:

*Вот случай такой. Моя знакомая рассказывает однажды. Говорит, вышла я к сараю, и стоит мой муж покойный. И так я испугалась, говорит, так меня затрясло, муж-то покойный. И я, говорит, не знаю, что мне делать. И вдруг он исчезает, растворяется в воздухе (Воронеж., №572).*

В народной культуре понятие «ходить» в применении к умершему включает в себя весь комплекс представлений, связанных с «ходячим» покойником. Когда говорят: «К одной женщине ходил муж» (Чер., № 21), – всем носителям традиции сразу становится ясно, что речь идет именно об умершем человеке.

Главная особенность этих мифологических персонажей – их «неуспокоенность» на том свете, что побуждает их возвращаться в мир живых людей. Причины «хождения» могут быть различны: нераскаянные грехи умершего, занятия им колдовством, магией, самоубийство, преждевременная, «не

<sup>1</sup> Материалом анализа послужили тексты быличек из сборников: [2, 3, 4, 5]

своя» смерть и др.[6]. Наряду с представлением о том, что с «того» света является сам покойник, в традиции существует мнение, что в тело покойного может вселяться нечистая сила и в облике умершего приходит к тоскующим людям:

*К вдовам муж покойный ходит, но это же не покойный, а в его образе кто-то приходит, чтоб увести с собой, может, или просто соблазнить женщину (Чер., № 24).*

*В одной семье муж и жена друг друга очень любили. Но вот муж силь-но заболел и умер. Поплакала, погоревала молодая вдова и схоронила мужа. Плохо одной, но делать нечего – надо жить дальше. Через некоторое время смотрим, а вдова стала с каждым месяцем выглядеть все хуже и хуже. Вянет прямо на глазах, но смеется. Решили потихонечку распрощать ее, отчего она стала такая веселая. А она радостно так и рассказывает, что муж ее стал к ней в гости приходиться. Теперь она опять не одна. Правда, говорит, он какой-то на ощупь стал лохматый. Мы так и ахнули. Ведь это был не муж ее, а сатана в его облике (Воронеж, №581).*

Представления о «ходячем» покойнике достаточно устойчивы в славянской народной культуре, и сейчас они существуют в актуальной форме. Даже в современной городской среде можно довольно часто услышать рассказы если не о зримом явлении умершего родственника, то по крайней мере, о сновидениях, в которых умершие выступают активными действующими лицами

Парадоксально, но «ходячим покойником», да и просто «покойником», «мертвецом» и т.п. в народной традиции этого персонажа называют редко. Если посчитать все слова, обозначающие этого персонажа в народных мифологических рассказах<sup>2</sup>, то оказывается, что наименования мертвого человека (мертвец, покойник, утопленник и др.) и слова, квалифицирующие этот персонаж как сверхъестественный (*нечистая сила, черт, привидение, дух, душа и др.*), составляют всего лишь около 13% от общего количества наименований. Большую часть обозначений этого персонажа (86,4%) составляют слова, категоризирующие его как человека (антропонимы в широком смысле слова):

- термины родства и свойства (*сын, мать, муж, сестра и др.*);
- существительные со значениями пола и возраста (мужик, девочка, старик и др.);
- имена собственные (*Иван, Ильяха, Васечка и др.*).

Сюда же с небольшой оговоркой можно отнести и случаи наименования с помощью местоимений – личных (*он, она*), неопределенных (*кто-то*), указательных (*тот, этот и др.*).

Если же понаблюдать над тем, как устроен текст, как слова сочетаются друг с другом, то будут очевидны и некоторые другие закономерности наименования данного мифологического персонажа. Обратим внимание на то, как персонаж вводится в повествование и как его при этом называет рассказчик.

Это осуществляется двумя основными путями, которые соответствуют двум способам организации содержания текста.

<sup>2</sup> Контент-анализ лексики проводился по корпусу текстов из указанных выше сборников русской мифологической прозы

Первый способ (наиболее частотный – примерно 80% примеров) представляет собой антропонимическое наименование персонажа, т.е. его обозначение как человека, в сочетании с характеристикой «умерший» (*умер, утонул, повесился, умерши, задавивши, померла и т.д.*):

*Умер у нас дед (Зин., № 387).*

*У меня племянника убило, так видела привидение (Чер., № 14).*

*У одной женщины умер муж. И он стал к ней приходить (Воронеж., №575).*

*А в деревне была только помершая старуха (Чер., №10).*

*Умерла молодая девушка, а позже ее матери снится сон (Воронеж., №552).*

*У них мужик повесился (Чер., № 33).*

Второй способ введения персонажа в текст (гораздо менее частотный) – с помощью конструкций, представляющих персонажа как неизвестного не только слушающему, но даже самому рассказчику: неопределенных местоимений (*кто-то, какой-то*), наименований человека (*человек, мужчина, женщина и др.*) в сочетании с характеристиками внешнего облика (как правило, одежды), а также с помощью безличных предложений без всякого указания на того, кто совершает действие (*чудится, мерещится*)<sup>3</sup>. Персонажи, вводимые в текст таким образом, обычно изображаются в движении:

*Вдруг слышу (а пол-то каменный): вот так кто-то шаркает ногами, как человек... (Зин., №410).*

*Идет мужчина какой-то по канаве, без шапки (Чер., № 5).*

*...прихожу я домой, а там какой-то юноша 17 лет моет полы (Воронеж., №576).*

*А вот Галка-то наша, вот сыно-от у нее болел, так говорит, мужик к ей пришел, высокий такой, с бородой черной, все сына просил, так не отдала она его (Чер., № 29).*

*Ну, она встала, открыла окошко и вдруг видит, что женщина така в белом платье и платке и просит, дай мне, мол, водицы (Чер., № 30).*

*Слышу, говорит, шоборчит. <...> Шурудит (Зин., №411).*

Такие тексты содержат интригу: событие сначала описывается как тривиальное, как происходящее с обычным человеком (действительно, что необычного в том, что человек перемещается в пространстве?), и только потом выясняется, что этот человек – мертвый.

Собственно, в этом и состоит основное событие текста, говоря словами Ю.М. Лотмана – «значимое отклонение от нормы» [9], а коммуникативное задание текста, таким образом, – это правильная идентификация персонажа, опознание его как покойника. Тексты этого типа остросюжетны, вызывают сильные эмоции, чувство страха, и наилучшим образом выполняют развлекательную функцию, свойственную быличке. Ср.:

*С девушкой одной пошли жать. В Интоморе еще. Рано утром. Идет мужчина какой-то по канаве, без шапки. Идет навстречу, а навстречу не попал. А потом сказали нам: сорочины были сегодня, он и шел туда. Его как раз той дорогой везли (Чер., №5).*

<sup>3</sup> Эта особенность обозначения мифологического персонажа в славянских мифологических текстах подробно описана в работах Е.Е. Левкиевской [7].

*Хлопец гуляў з деўкай: «Пайдём пагуляем». Вёў, вёў, далёко. [Спрашвае ея]: «Не боіцца мене?» – «А чого?» – «Пайдём шчэ. Не баіцца?». Вёў і опять: «Не баіцца мене? Пайдём!». Поняла яна, што не хлопец. Приводит ў землянку. Там нора. «Лезь!» – кажэ. «Тёмно, не палезу!». Начала молитву чытаць <...> То чорт буў, а не хлопец (Полесье, №136). Раз леглі мы з дачкой спаць. Тут дверь открываецца і як бы воздухам ў хату – і прайшло. І ходіць, і ходіць па хате. І такой страшэнны вецер, аж по ўсей хате рубаешчкі дзетскія паразбросало. А дочка і гаворыць: то бацька [умершы] прайшоў (Полесье, №265).*

Как выяснилось, тексты этого типа, т.е., в которых не сообщается с самого начала о том, что речь пойдет об умершем человеке, относятся только к одному сюжетному типу – в них описывается только факт явления покойника, и это уже достаточное событие для текста, построенного таким образом. Для рассказов же, где слушателю заранее известно о том, что действующее лицо – покойник, характерно более разнообразное содержание: это и сожительство покойного мужа с оставшейся в живых женой (напр., *Зин.*, №397; *Чер.*, №23, 24), и вредоносные действия покойника по отношению к детям (*Зин.*, №386, 399; *Чер.*, №41), и опознание демона в покойнике (*Воронеж.*, №581-585; *Чер.*, №20, 22), и совершение защитных действий (*Зин.*, №390, 397; *Воронеж.*, №581-595), и взаимодействие с персонажем – передача предметов на тот свет (*Воронеж.*, №547-557; *Чер.*, №46-47), хотя встречаются тексты, содержание которых составляет только описание явления мифологического персонажа (напр., *Зин.*, №405; *Чер.*, №13).

В текстах, где идентификация персонажа как умершего происходит уже в начале повествования, сразу же подготавливаются ожидания слушателей и случай описывается и воспринимается как сверхъестественный. Здесь возникает другая коммуникативная задача – обучение правильному (с точки зрения традиции) поведению в данной ситуации, прежде всего, способам избегания от нежелательных «визитов». Ср:

У одной женщины умер сын. И по ночам она стала замечать, что кто-то ходит по дому (после смерти еще не прошло 9 дней). Однажды ночью она обернулась, а напротив кровати стоял шифоньер с зеркалом. Ночь была лунная, и в нем женщина увидела тень. Она решила, что это ее сын. Ей посоветовали сходить в церковь и поставить свечку за упокой его души. Она так сделала, и сын перестал к ней ходить (*Воронеж.*, №588).

*Жили раньше в нашем селе муж с женою. И все у них было хорошо, ладно. Люди смотрели и завидовали. И неожиданно мужик умирает. И начались у вдовы несчастья. То одно случится, то другое. Целыми днями она плакала, на могилку ходила. Муж к ней ночью являлся, говорил, что плохо ему там, денег нет. Посоветовали вдове сходить к бабушке. Пошла она, рассказала все. Бабушка ей сказала, как только кто умрет, так положить ему в гроб горстку мелочи. Так она и сделала. Все у нее потом наладилось. Даже мужика потом она себе нашла, хорошего (*Воронеж.*, №554).*

*Рассказывает: приснился мне сон, и дочка говорит мне, сходи на такой-то улице, и дом сказала. От, мол, пришли вот по той [с той]*

*девочки, и имя назвала девочки, точно такое имя. Положила мать в гроб тапочки, и сниться перестало (Чер., №46).*

Очевидно, именно информативной направленностью и обусловлено большее содержательное разнообразие этих текстов – повествование в них служит наглядной иллюстрацией верований, связанных с данным персонажем.

Возвращаясь к выводу о значимости для организации текста былички характеристики персонажа как умершего, отметим, что сама эта характеристика, несмотря на то, что она имеет, как правило, глагольную форму (сестра умерла, племянника убило, померла жена), является прямым и наиболее типичным наименованием «ходячего» покойника в мифологических рассказах. Эта особенность вполне соотносится с описанной Е.Е. Левкиевской логикой носителя традиции, который характеризует мифологический персонаж прежде всего через функции [8], и, по всей видимости, представляет собой проявление более общей фольклорной тенденции именования, отмеченной С.Ю. Неклюдовым, – изображения и организации предметного мира фольклора через действие: «...персонаж бывает определим обычно типом своего поведения» [10].

Таким образом, обозначение мифологических персонажей в конкретных мифологических рассказах, бытующих в устной среде, не всегда совпадает с теми наименованиями, которые им усвоила традиция в представлениях и верованиях. Принципы именования мифологических персонажей и явлений оказываются напрямую связаны с коммуникативной ситуацией, в которой произносится текст, и с его коммуникативной задачей – той целью, ради которой человек начинает рассказывать о «потустороннем».

## Литература:

1. Об особенностях мифологического мышления: Неклюдов С.Ю. Структура и функция мифа // Современная российская мифология. Сост. М.В. Ахметова. М.: РГГУ, 2005. – С. 9–26.
2. Былички и бывальщины Воронежского края: сб. текстов / Сост. Т.Ф. Пухова. Воронеж: Научная книга. – 2009. – 386 с. (Воронеж.)
3. Мифологические рассказы и легенды Русского Севера / Сост. и автор комментариев О.А. Черепанова. СПб.: СПбГУ, 1996. – 212 с. (Чер.).
4. Мифологические рассказы русского населения Восточной Сибири / Сост. В.П. Зиновьев. Новосибирск: Наука. – 1987. – 400 с. (Зин.).
5. Народная демонология Полесья: Публикации текстов в записях 80–90-х годов XX века / Составители: Л. Н. Виноградова, Е. Е. Левкиевская. М.: Рукописные памятники Древней Руси. – 2012. Т. II: Демонологизация умерших людей. – 800 с. (Полесье).
6. Славянские древности. Этнолингвистический словарь / Под общей ред. Н.И. Толстого. М., 2009. – Т.4. С. 112–124; Толстая С.М. Полесские поверья о ходячих покойниках // Восточнославянский этнолингвистический сборник. Исследования и материалы. М.: Индрик. – 2001. – С. 156–205.
7. Левкиевская Е.Е. Прагматика мифологического текста // Славянский и балканский фольклор. Семантика и прагматика текста. [Вып.10]. М.: Индрик. – 2006. – С. 150–214.

8. *Левкиевская Е. Е.* Мифологический персонаж: соотношение имени и образа // Славянские этюды. Сборник к юбилею С. М. Толстой. М.: Индрик. – 1999. – С. 243–257.

9. *Лотман Ю.М.* Структура художественного текста // Лотман Ю.М. Об искусстве. СПб.: Искусство-СПб. – 1998. – С. 166.

10. *Неклюдов С.Ю.* Особенности изобразительной системы в долитературном повествовательном искусстве // Ранние формы искусства. Сост. С.Ю. Неклюдов. Отв. ред. Е.М. Мелетинский. М.: Искусство. – 1972. – С. 213.

# Теория оптимального кризиса, или что кочевнику хорошо...

А.В. Борисов, Р.А. Мимоход, В.А. Демкин

*Мимоход Роман Алексеевич,*  
научный сотрудник Института  
археологии РАН

*Демкин Виталий Александрович,*  
доктор биологических наук, профес-  
сор, заместитель директора по на-  
уке Института физико-химических  
и биологических проблем почвоведения РАН

*Борисов Александр Владимирович*  
кандидат биологических наук,  
старший научный сотрудник  
Института физико-химических и  
биологических проблем почвоведения  
РАН

*Проект РФФИ № 13-06-11511*

## Из двух зол выбирай большее

Жизнь древнего населения во многом определялась условиями окружающей среды. При этом единственным инструментом, позволяющим смягчить действие внешних природных факторов, являлась хозяйственная модель – тип, структура и формы организации производящего хозяйства. По мере того как происходило совершенствование хозяйственной модели, адаптация ее к неблагоприятным условиям, происходило расширение потенциальных экологических ниш, в которых могло существовать общество носителей этой хозяйственной модели. В результате постепенно сформировалось огромное разнообразие форм производящего хозяйства, что позволило человечеству освоить почти все природно-климатические зоны, за исключением абсолютно непригодных для проживания экстремальных высокогорных, арктических и пустынных районов.

Но по мере возрастания экстремальности условий окружающей среды потенциальный набор хозяйственных моделей становился все уже и уже, вплоть до ситуации, когда общество могло существовать, лишь занимаясь одной единственной формой деятельности. При этом чрезвычайно возрастает необходимость

неизменности внешних условий; иными словами – пусть будет плохо, но будет одинаково плохо всегда. В этой ситуации платой населения за возможность расширения географии проживания становится высокая зависимость от изменений степени неблагоприятности внешних природных условий. Общество в своей борьбе с суровым настоящим ценою чрезвычайного напряжения духовных и физических сил вырабатывает определенные механизмы, позволяющие выжить в еще более тяжелых условиях будущего. Это происходит естественно, без специальных усилий: просто человек, как и общество в целом, склонен ожидать худшего; подсознательно готовится к нему; и когда оно, это худшее, наступает, человек оказывается вооружен, подготовлен, настроен на борьбу. И, зачастую, побеждает.

Гораздо сложнее складывалась судьба обитателей экстремальных природных зон при смягчении условий окружающей среды. Здесь особенно ярко становится видна необратимость такого рода сверхадаптации: на определенном уровне возврата уже нет. По всей видимости, именно в таком ключе следует рассматривать судьбу лолинской культуры<sup>1</sup> эпохи средней бронзы (XXII–XVIII вв. до н.э.).

### **Жаркое лето 1953 до н.э.**

Финал эпохи средней бронзы на юге Восточной Европы ознаменовался серьезными культурными изменениями. Они выразились в деструкции существовавших ранее на этом пространстве катакомбных культур и в формировании на их основе блока посткатакомбных культурных образований. Лолинская культура является одной из составляющих блока посткатакомбных культурных образований [7]. Время его существования определяется по серии калиброванных радиоуглеродных дат в пределах XXII–XVIII вв. до н.э. [9].

В инвентарно-обрядовом комплексе лолинской культуры выделяется два основных компонента, которые отчетливо прослеживаются на раннем этапе. Первый из них связан с восточно-маньчской катакомбной культурой (ВМКК), памятники которой предшествовали появлению лолинской культуры, в рассматриваемом регионе. ВМКК являлась той местной подосновой, на которой сформировалась лолинская культура. Второй компонент, хорошо фиксируемый в лолинской культуре, связан с культурами средней бронзы Северо-Восточного Кавказа и имеет ближайшие аналогии в гинчинских и присулакских памятниках. Эти два компонента фиксируются и в металлургической традиции [5], и с помощью антропологических данных [12]. Таким образом, на настоящий момент имеются достоверные данные о передвижении групп населения Северо-Восточного Кавказа в степь, которое привело к качественным культурным переменам в степной зоне.

Описываемые события происходили в середине суббореального периода голоцена, сопровождавшегося резкой аридизацией климата афро-евразийского масштаба. В этот период возникают песчаные пустыни в междуречье Тигра и Евфрата, наблюдается катастрофическое иссушение ландшафтов в

---

<sup>1</sup> Свое название эта культура получила по первому изученному памятнику у с.Лола (Республика Калмыкия), где впервые был зафиксирован погребальный обряд, характерный для культуры в целом.

Средней Азии и Северной Месопотамии, пересыхают реки и озера. Около 4000 лет назад появилась пустыня Сахара, произошло максимальное понижение уровня Мирового океана в голоцене. Опустынивание и засоление земель в определенной степени способствовало упадку и даже гибели древних цивилизаций Передней Азии (Шумер, Вавилон, Раджастан).

Эти явления в той или иной мере затронули и всю Восточную Европу. Результаты исследования палеопочв финала средней бронзы в прикаспийских степях показали: в этот период имело место резкое усиление аридизации, которое закончилось самой масштабной экологической катастрофой за последние 6000 лет [6, с. 343–352]). В результате аридизации произошло смещение границ природных зон к северу, опустынивание степей и развитие степных ландшафтов в лесостепной зоне. Характерно, что пик аридизации хронологически совпал с появлением в Прикаспии поскатакомбных культурных формирований [2]. Очевидно, что возникновение долинской культуры находится в причинно-следственной связи с резким изменением палеоклимата. В таком случае, раз уж по данным археологии и антропологии фиксируется направление передвижения населения с Северо-Восточного Кавказа в степь, то понятно, что резкое ухудшение климата пагубно сказалось на образе жизни и системе хозяйства кавказских культур эпохи средней бронзы. Вероятнее всего, уход части населения из горной зоны в степь был вызван резким похолоданием с опусканием границы ледников [14]. Но парадокс ситуации заключается в том, что люди уходили в пустынную степь Прикаспия, где в этот период весь комплекс признаков аридизации проявлялся наиболее отчетливо. Так как же конкретно аридизация могла обусловить рассматриваемые миграционные процессы? Для ответа на этот вопрос необходимо разобраться в сути процесса аридизации.

В настоящее время под аридизацией понимается развитие комплекса природных процессов, связанных с уменьшением атмосферной увлажненности, что приводит к сокращению биологической продуктивности экосистем в результате увеличения испарения при снижении нормы осадков. Речь идет при этом о среднегодовом количестве осадков. Что касается испарения, то этот показатель связывают с особенностями, в первую очередь, теплого времени года. Но это не единственная неопределенность в трактовке аридизации. Особенности изменений температурного режима в данном случае определяются еще менее четко: предполагается, что при аридизации должны возрастать температуры летнего периода. Зимние же температуры остаются вообще вне поля исследований. В результате при слове аридизация возникает образ жаркой и безводной пустынной степи, которая стала еще более жаркой и безводной. Естественно, при таком представлении об аридизации остается непонятным факт выживания населения бронзового века в пустынно-степной зоне в аридные этапы голоцена. Данному вопросу и посвящена настоящая работа.

## **У природы есть плохая погода**

Наиболее распространенными методами реконструкции палеоклимата в археологических изысканиях являются палинологический [9, с. 214–216]; [10, с. 23–33]) и палеопочвенный методы [11]. Рассмотрим основные признаки, по которым с помощью данных методов диагностируется аридизация.

Палеопочвенный метод оперирует следующими основными диагностическими показателями аридизации: уменьшение мощности гумусового горизонта и сокращение запасов гумуса как следствие угнетенного роста растений при недостатке доступной влаги и активизации эрозийных процессов; близкое к поверхности расположение верхней границы аккумуляции легкорастворимых солей, карбонатов, гипса; увеличение их содержания в почвенном профиле; изменение морфологических параметров сегрегационных форм карбонатных новообразований; уменьшение величины магнитной восприимчивости и др.

В палинологических реконструкциях признаками аридизации являются сокращение до полного отсутствия древесной флоры и разнотравья и возрастание доли ксерофитных растений. И в том, и в другом случае в качестве причин описываемых изменений называется уменьшение атмосферной увлажненности или уменьшение среднегодовой нормы осадков. Такая трактовка вполне отвечает нуждам палинологии и палеопочвоведения, но явно недостаточна для археологических реалий. Для понимания социально-экономических условий существования древнего человека не достаточно данных о среднегодовой норме осадков. Необходимо знать распределение этого показателя по *сезонам года*, внутригодовую динамику температуры и увлажненности, так как лишь в этом случае станут понятны глубинные процессы в системе природная среда – древний человек.

Попытаемся отойти от абстрактных понятий среднегодовой нормы осадков и представить себе, как будут проявляться признаки аридизации при изменении нормы осадков и температуры в разные сезоны года. Для этого рассмотрим несколько возможных сценариев изменения климатических условий и отражение этих изменений в почвенных свойствах и споропыльцевых спектрах.

*Сценарий 1. Уменьшение количества осадков в теплый период года.*

В середине лета в пустынно-степной зоне в условиях господства азиатских антициклонов количество осадков минимально [1, с.14]. Дальнейшее их сокращение не вызывает значительных изменений ни в свойствах почв, ни в составе фитоценозов, поэтому не диагностируется с помощью палеопочвенного и палинологического методов.

*Сценарий 2. Увеличение количества осадков в теплый период года.*

В силу указанных выше причин летние осадки в пустынно-степной зоне редкие, имеют преимущественно ливневый характер, когда большая часть влаги теряется с поверхностным стоком. Доля продуктивной, т.е. доступной для растений влаги в данном случае минимальна, что не вызывает изменений в растительном покрове, которые могли бы оставить след в палиносpekтрах. Промачивание почвы также незначительно и не вызывает изменений почвенных свойств.

*Сценарий 3. Уменьшение количества осадков в холодный период года.*

Влагообеспеченность зимнего периода также контролируется азиатским антициклоном. При создании мощной антициклональной области осадков зимой практически не выпадает; устанавливается сухая и холодная погода. В результате не формируется снеговой покров. Это обстоятельство чрез-

вычайно важно, так как именно снеговой покров в пустынно-степной зоне является основным депо продуктивной влаги для растений. Не получив влагозарядки при весеннем снеготаянии, почва подвергается сильному иссушению уже в апреле, когда на территории пустынных степей отмечается частая повторяемость иссушающих ветров восточных румбов. Это приводит к угнетению растений; выживают лишь экстремальные ксерофиты, формируя соответствующий палиноспектр, отражающий резко выраженные аридные условия.

Признаки аридизации проявляются и в почвенном профиле. Происходит уменьшение мощности гумусового горизонта, сокращение запасов гумуса, подтягивание к поверхности почвы линии вскипания (вплоть до поверхностного вскипания), происходит аккумуляции солей в средней части профиля или даже верхних горизонтах; при отсутствии промачивания не формируется белоглазка; увеличивается содержание карбонатов, гипса; происходит уменьшение величины магнитной восприимчивости.

#### *Сценарий 4. Увеличение количества осадков в холодный период года.*

При ослаблении азиатского антициклона на территорию пустынных степей вторгаются воздушные массы южно-каспийских и средиземноморских циклонов, что приводит к выпадению осадков в виде снега. Также при ослаблении азиатского антициклона по территории пустынных степей в направлении с запада на восток проходят мощные штормовые циклоны, вызывающие обильные снегопады и метели. Такие циклоны обычно заканчиваются вторжением масс арктического воздуха; оттепели со снегопадами и метелями сменяются длительными периодами очень холодной погоды. В итоге в зоне пустынных степей формируется довольно мощный снеговой покров. Если в зимний период выпадает много осадков в виде снега, если снеговой покров сохраняется до весны и если весной создаются благоприятные условия для медленного снеготаяния, то в почве накапливаются значительные объемы продуктивной влаги. Частично снег растаивает зимой в периоды оттепелей. В итоге почва промачивается на глубину до 40–60 см, а на участках с легким гранулометрическим составом – на глубину до метра [1, с. 73]. Вымываются токсичные для растений соли, создаются благоприятные условия для роста растений, чувствительных к засоленности почвы. Мощная влагозарядка в период весеннего снеготаяния обеспечивает достаточно высокие запасы влаги в почве, что существенно увеличивает видовое разнообразие растений, сокращение ксерофитной флоры и возрастание в фитоценозе доли влаголюбивых видов. В этой ситуации споропыльцевой метод будет диагностировать период гумидизации.

В почве при этом будет происходить накопление гумуса, рост гумусового горизонта, вымывание водорастворимых солей в нижнюю часть почвенного профиля, снижение глубины вскипания, формирование крупной хорошо выраженной белоглазки, увеличение магнитной восприимчивости в верхних горизонтах и т.д. Иными словами – при палеопочвенных реконструкциях этот период также будет диагностироваться как период оптимизации природных условий.

Таким образом, аридизация в пустынно-степной зоне выражается в усилении континентальности климата, сопровождающейся уменьшением нор-

мы осадков в холодный период года и понижением зимних температур. Обратный процесс – гумидизация – происходит при увеличении влагообеспеченности зимнего периода, и наиболее ярко проявляется в условиях мягкой зимы с обильными осадками, высоким снежным покровом, частыми оттепелями. Влагообеспеченность летнего периода не оказывает существенного влияния на свойства почв и характер палиноспектров.

Теперь, рассмотрев конкретные механизмы проявления аридизации и гумидизации, перейдем к вопросам влияния данных климатических событий на жизнь древнего населения пустынно-степной зоны. Известно, что на протяжении всей эпохи бронзы основу экономики древнего населения составляло мобильное скотоводство [13, с. 345]. Никакая иная модель хозяйства не могла обеспечить выживание общества в условиях прогрессирующей аридизации климата в III в. до н.э. При этом население, выпасая скот, на протяжении всего года перемещалось в достаточно узких экологических нишах; меридиональные перекочевки были на тот момент неизвестны. Проживание в засушливом и жарком климате выработало в обществе довольно сложные механизмы адаптации к неблагоприятным природным условиям, причем основные усилия были направлены на выживание в летний засушливый период. В самом простом случае ответом общества на усиление аридизации являлось увеличение мобильности и сокращение стационарных периодов во время кочевий [15, р.6], а также изменение состава стада с увеличением доли мелкого рогатого скота.

Специализация на разведении овец особенно ярко заметна в лолинской культуре. Эти неприхотливые животные способны выживать в условиях очень аридного климата, в течение длительных периодов довольствуясь минимумом корма самого низкого качества. В составе стада восточно-маньчжской катакомбной культуры, существовавшей в пустынных степях в XXVI–XXII вв. до н.э. и хронологически предшествовавшей лолинской культуре, около половины составлял крупный рогатый скот. Климат в тот период был довольно близок к современному, но с выраженной тенденцией к усилению засушливости. В результате прогрессирующей аридизации кормовая база сокращалась; и в определенный момент растительный покров стал настолько бедным, что крупный рогатый скот уже не мог прокормиться, и только овцы могли выжить в этих условиях. Поэтому лолинская культура полностью перешла на разведение овец.

Так общество и экономика адаптировались к постоянно аридным условиям теплого времени года, и некоторое дополнительное усиление засушливости в летний период не приводило к фатальным последствиям.

Но против неблагоприятных условий холодного периода года общество скотоводов лолинской культуры не смогло выработать никаких адаптационных механизмов. И здесь в полной мере раскрывается вся колоссальная польза аридизации для протокочевой экономики лолинской культуры, и связана она с холодными малоснежными зимами, позволяющими прокормить скот на протяжении холодного времени года.

Известно, что определяющими факторами для успешной пастбы в зимний период являются высота снежного покрова, плотность снега, наличие в

снеге ледяных прослоев, наста, а также частота оттепелей, осадки и туман. Выпас мелкого рогатого скота становится невозможен при рыхлом снеге высотой более 25–30 см, при плотном снеге пастьба неэффективна уже при высоте снегового покрова 5–10 см [1, с. 92]. Следует отметить, что эти значения относятся лишь к северным склонам, так как на южных подветренных склонах холмов высота снегового покрова в силу большей частоты ветров северного направления всегда оказывается выше предельно допустимой и исключает пастьбу. Наличие в слое снега тонких прослоек льда мощностью до 5 мм, образующихся при кратковременных оттепелях, практически делает невозможной пастьбу даже при малой высоте снега. Тот же эффект на выпас скота оказывает гололед, оледенелый мерзлый снег. Вторжение циклонов в зимний период, как правило, сопровождается многодневными осадками, туманами, что приводит к потере скотом ориентировки, скученности, неэффективной пастьбе. Наступающее после прохождения циклонов резкое и устойчивое похолодание вызывает длительный невыпасной период, продолжительностью до 30 и более дней. В этой ситуации необходимы запасы кормов, но в эпоху бронзы в рассматриваемом регионе запасание кормов не практиковалось в виду крайней изреженности растительного покрова, отсутствия крупного разнотравья, деревьев и кустарников. Не было в стаде и лошадей, способных добывать корм под слоем рыхлого снега до 60 см, и плотно – до 30 см, оставляя не съеденные части растений овцам. При отсутствии запасов кормов наступление продолжительного не выпасного периода приводило к гибели стада. О судьбе населения, лишившегося скота, в условиях отсутствия иных средств существования, говорить не приходится.

Но именно такие драматические периоды в истории ранних скотоводов пустынных степей по данным палеопочвоведения и палинологии реконструируются как периоды гумидизации и оптимизации природных условий. В степи создаются благоприятные условия для всех ее обитателей, кроме человека. И причиной тому – несоответствие хозяйственной модели новым, более благоприятным условиям. Конкретные ограничения – высокая норма осадков в зимний период и чередование оттепелей и морозов. В более северных и западных регионах, в зоне сухих степей и лесостепи, в условиях комплексной диверсифицированной хозяйственной модели и при возможности запасания кормов, население могло успешно переживать длительные не выпасные периоды. В экономике лолинской культуры таких механизмов не было.

В результате вся территория пустынных степей практически полностью обезлюдела почти на тысячелетие: эпоха поздней бронзы, практически не представлена в данном регионе. Причем, это происходило в условиях довольно благоприятного, относительно влажного климата. Для покровской культуры эпохи поздней бронзы, сменившей лолинскую культуру на северных окраинах распространения последней, реконструированы довольно гумидные палеоэкологические условия [11]. В результате смягчения климата носители покровской культуры и более поздней срубной культурной традиции смогли создать многоотраслевую диверсифицированную модель хозяйства, сочетающую придомное скотоводство с элементами земледелия. В этот период возникают стационарные поселения, в стаде вновь появляется крупный рогатый

скот, создаются запасы кормов на зимние невыпасные дни. Но все это наблюдается лишь севернее широты современного Волгограда. Южнее, на колоссальном пространстве юга Волгоградской области, Калмыкии, восточных районов Ростовской области и севера Ставропольского края людей не было.

И причиной тому является отсутствие хозяйственной модели, соответствующей новой природной ситуации. Для комплексного хозяйства срубного мира данная территория была все еще слишком аридной, в то время как для общества ранних скотоводов – уже слишком гумидной. Новая страница в истории освоения пустынных степей юго-востока Русской равнины будет написана только в сарматскую эпоху. Этот регион вновь станет доступен для проживания лишь после того, как население в полной мере овладеет всеми хозяйственными, политическими и социальными инструментами номадизма в его классическом виде. Вооруженные столь мощным орудием выживания, которым является номадизм, люди освоят и этот регион, и гораздо более аридные ландшафты. И через тысячу лет курганы, оставленные лопатками, вновь увидят людей. Увидят тех, кто смог пойти дальше их, кому удалось выжить и победить в борьбе с суровой природой пустынных степей.

## Литература

1. Агроклиматические ресурсы Калмыцкой АССР. Ленинград, Гидрометиздат. 1974 124 с.
2. Борисов А.В., Мимоход Р.А., Демкин В.А. Палеопочвы и природные условия южнорусских степей в посткатакомбное время // Археология восточноевропейской лесостепи. Воронеж. – 2009.
3. Борисов А.В., Мимоход Р.А., Демкин В.А. Палеопочвы и природные условия южнорусских степей в посткатакомбное время // Краткие сообщения института Археологии. – Вып. 225. – 2011. – С. 144–154
4. Борисов А.В., Мимоход Р.А. Палеоэкологические условия и механизмы сложения лопаточной культуры. Материалы III Международной Нижневолжской археологической конференции. – Астрахань. – 2010. – С. 54–60.
5. Гак Е.И., Калмыков А.А., Мимоход Р.А. Сурьмяные украшения в погребениях лопаточной культуры юго-запада степного Ставрополя // Юбилейные XXV «Крупновские чтения» по археологии Северного Кавказа. Отражение цивилизационных процессов в археологических культурах Северного Кавказа и сопредельных территорий. – 2008.
6. Демкин В.А., Демкина Т.С., Борисова М.А., Шишлина Н.И. Палеопочвы и природная среда Южных Ергеней в конце IV–III тыс. до н.э. // Почвоведение. – 2002. – № 6. – С. 343–352.
7. Мимоход Р.А. Блок посткатакомбных культурных образований (постановка проблемы) // Проблеми дослідження пам'яток археології Східної України. – Луганськ, 2005. – С. 70–74.
8. Мимоход Р.А. 2009. Радиоуглеродная хронология посткатакомбных культурных образований Предкавказья // Пятая Кубанская археологическая конференция. – Краснодар. – С. 253–257
9. Спиридонова Е.А. Эволюция растительного покрова бассейна Дона в верхнем плейстоцене-голоцене. – М.: Наука. – 1991. – 221 с.

10. Спиридонова Е.А., Алешинская А.С. Периодизация неолита-энеолита по данным палинологического анализа // Российская археология. – 1999. – № 1. – С. 23–33.
11. Демкин В.А. Почвоведение и археология // Пушино: ОНТИ НЦБИ АН СССР. – 1997. – 213 с.
12. Хохлов А.А., Мимоход Р.А. 2008. Краниология населения Степного Предкавказья и Поволжья посткатакомбное время // Вестник антропологии. – М. – Вып.16. – С. 44–70.
13. Шишлина Н.И. Северо-западный Прикаспий в эпоху бронзы (V–III тыс. до н.э.). Труды ГИМ. – 2007. – С. 345.
14. Grove J.M. Little Ice Ages: Ancient and Modern. New York: Routledge, 2004. – 498 p.
15. Wendrich W., Barnard H. The Archaeology of Mobility: Definitions and research approaches/ In Book: The Archaeology of Mobility. Old World and New World Nomadism. Ed. by Hans Barnard and Willike Wendrich. – 2008. – 603 p.

# Влияние размера заработной платы на мотивацию работодателей вводить инновации: агент-ориентированный подход

Р.Х. Бахитова, И.У. Зулькарнай

*Бахитова Ралия Хурматовна, доктор экономических наук, доцент, заведующая кафедрой математических методов в экономике Башкирского государственного университета*

*Зулькарнай Ильдар Узбекович доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры экономики и менеджмента Уфимского государственного университета экономики и сервиса, заведующий лабораторией социально-экономических исследований Уфимского государственного университета экономики и сервиса*  
Проект РФФИ № 13-06-11515

**П**роблематика влияния размера заработной платы на инновационные процессы в экономике, повышение производительности труда восходит к работам академика Д.С. Львова [3]. В его работах было обращено внимание на интересный парадокс: по уровню почасовой производительности труда (hourly productivity) Россия отстает от развитых стран. В то же время на один доллар заработной платы российский работник производит в три раза больше продукции, чем его коллега в США [3]. Таким образом возникла идея, что российскому рабочему недоплачивают, как ранее недоплачивали советскому рабочему, даже в условиях более низкой почасовой производительности труда.

Эти идеи были развиты членом-корреспондентом РАН Д.Е. Сорокиным и академиком Р.И. Нигматулиным в теорию снижения инновационной производительности со стороны работников в условиях низкого уровня оплаты труда [6]. Ее суть в том, что сложившийся в странах Запада высокий уровень доходов наемных работников создает мотивацию для внедрения инноваций, а поддерживающийся в России столетиями низкий уровень заработной

платы как раз и является причиной хронического торможения инновационных процессов в стране.

В модели механизма торможения инновационных процессов, развитой Д.С. Львовым, Р.И. Нигматулиным и Д.Е. Сорокиным, выделены причинно-следственные связи между низким уровнем заработной платы и явлением торможения инновационных процессов: социальная напряженность, вызванная различием в доходах; подрыв воспроизводственных процессов в силу уровня зарплаты на грани выживания; низкая способность населения выкупать всю произведенную продукцию и услуг. Как отмечает Д.Е.Сорокин, «люди с «затянутыми поясами» не могут быть источником и проводником инноваций» [8]. Данный подход раскрывает причины торможения инноваций со стороны наемного работника.

Наряду с вышеописанным объяснением механизма торможения инновационной активности со стороны работника, возможно объяснение и со стороны работодателя. Так, И.У. Зулькарнаем, Д.Г. Ахмадуллиным, Н.Р. Гизатовым выдвинута и изучена гипотеза о том, что низкий уровень оплаты труда в отрасли промышленности способствует низкому уровню инновационной проводимости в этой отрасли вследствие желания работодателей получать большую прибыль за счет низких издержек на оплату труда рабочим, а не за счет инновационного развития отрасли [13, 14, 15]. Соответственно, увеличение издержек на оплату труда вынуждает работодателей интенсифицировать инновационные процессы.

Эта гипотеза была изучена методами агент-ориентированного моделирования (АОМ). В этих моделях реальным агентам экономической деятельности (люди, фирмы, государство) сопоставляются виртуальные агенты, существующие в компьютерно-организованной среде. В какой-то мере это напоминает виртуальный мир, созданный в известном фильме «Матрица». В практических и научно-исследовательских целях такие виртуальные миры создаются с применением специальных компьютерных программ. В России этот подход в изучении экономических процессов активно развивается академиком РАН В. Л. Макаровым и доктором экономических наук А.Р. Бахтизиным в рамках «Лаборатории искусственных обществ» [1, 2].

На базе агент-ориентированного подхода И.У. Зулькарнаем, Д.Г. Ахмадуллиным, Н.Р. Гизатовым была разработана модель в среде специального языка моделирования NetLogo. Все агенты в этой модели действуют на двух территориях, которые условно названы «Россия» и «Запад».

Агенты-работодатели в «России» и на «Западе» занимаются предпринимательской деятельностью, выбирая технологии и нанимая работников в целях расширения своего бизнеса, имея только одно отличие – уровень затрат на оплату труда наемных работников. На «западной» территории начальный уровень заработной платы задан в два раза выше, чем на «российской» территории.

Экзогенным фактором, который задается в модели, являются цена технологии и ее производительность. Эксперименты проводились при низкой и высокой цене технологии, при высокой и низкой производительности технологии. Соответственно получалось четыре комбинации: 1) дорогая тех-

нология, но высокопроизводительная; 2) дорогая и низкопроизводительная технология; 3) дешевая и высокопроизводительная технология; 4) дешевая и низкопроизводительная технология.

В результате компьютерных экспериментов были получены интересные и неожиданные результаты. Рассмотрим вариант высокого значения цены технологии и высокого роста производительности труда от внедрения технологии (высокой его эффективности).

На 50-м шаге западный работодатель внедряет новую технологию, достигнув нулевую предельную прибыль. Высокая цена технологии вызывает возникновение долга, который препятствует найму новых работников. В результате внедрения новой технологии производительность труда работников возрастают в полтора раза. В это время российский работодатель продолжает нанимать работников, и его предельная прибыль постепенно уменьшается, но остается положительной в силу его низких издержек на зарплату. Российский работодатель внедряет первую технологию на 100-м шаге, а на 135-м шаге западный работодатель внедряет уже вторую технологию. Его предельная прибыль сразу после внедрения превышает предельную прибыль, которая была вначале, а его прибыль опережает прибыль российского конкурента ускоряющимися темпами.

Результатом эксперимента является вывод, что в условиях доступности высокопроизводительных но дорогих технологий западный работодатель в долгосрочной перспективе превосходит по получаемой прибыли российского.

Далее рассмотрим случай доступности высокопроизводительных и дешевых технологий.

Для западного работодателя внедрение новых технологий в этих условиях происходит более интенсивно, в силу того, что технологии дешевые, значительный долг не возникает, что позволяет увеличивать число рабочих после покупки технологии.

Так же, как в предыдущем эксперименте, западный работодатель в долгосрочной перспективе превосходит по получаемой прибыли своего российского конкурента.

В третьем варианте задана высокая цена технологии, низкая ее эффективность (дает небольшой рост производительности труда от ее внедрения). Западному работодателю каждую новую технологию приходится покупать в долг, так как цена технологии высокая и уровень зарплаты высокий. Российский работодатель, выплачивающий значительно меньшую заработную плату, покупает технологию и обходится собственными ресурсами. В результате российский работодатель в долгосрочной перспективе вырывается далеко вперед от своего западного конкурента.

Четвертый вариант – это доступность только низкоэффективной и дешевой технологии. В этих условиях предельная прибыль у российского и западного работодателей колеблется с малой амплитудой и не дает кому-либо вырваться вперед по этому показателю.

Итак, использование агент-ориентированного подхода позволило получить ряд интересных и неочевидных результатов. Так, если производителям доступны высокоэффективные (дающие большой рост производительности

труда) и дорогостоящие инновации (требующие значительного времени окупаемости), то страны, поддерживающие высокий уровень заработной платы наемных работников, обгоняют по своему развитию страны, «экономящие» на зарплате. Особенно большой выигрыш странам с высокой зарплатой дает ситуация, когда оказываются доступны высокоэффективные и недорогие (быстро окупаемые) технологии.

Тем самым подтверждается гипотеза, что высокий уровень затрат предпринимателя на выплату заработной платы является самостоятельной детерминантой инновационно-ориентированной экономики. Но этот вывод справедлив только при условии доступности производителям инноваций, дающих большой рост производительности труда по отношению к затратам на их внедрение.

Если же производителям доступны только низкоэффективные и дорогие инновации, то экономика с низким уровнем заработной платы показывает более высокий уровень совокупной прибыли в долгосрочной перспективе.

В условиях доступности низкоэффективных и дешевых инноваций уровень заработной платы не дает преимуществ ни одной стране.

Эти результаты позволяют понять причины торможения развития инноваций в российской экономике. В силу особенностей культуры производства (менталитета, навыков производства) одна и та же технология, одна и та же инновация в условиях России оказывается менее эффективной. Другими словами, внедрение инновации в России дает меньший рост производительности труда, чем внедрение той же инновации на Западе.

Но тогда, как видно из описанных результатов агент-ориентированного моделирования, внедрение инноваций в России не дает ей преимуществ, даже если поддерживать высокий уровень заработной платы. Тем самым, поднятие уровня заработной платы само по себе не оказывается экономически оправданным.

Данный вывод в части позитивной экономики позволяет прийти к обоснованному заключению в части нормативной экономики: чтобы перейти к инновационному типу производства, России надо в первую очередь изменить культуру производства. Только тогда высокий уровень заработной платы станет драйвером инновационного развития.

## Литература

1. Макаров В.Л. «Искусственные общества». – 2006 г.
2. Бахтизин А.Р. «Агент-ориентированные модели экономики» // Москва, ЗАО «Издательство Экономика». – 2008 г.
3. Львов Д.С. «Путь в XXI век: Стратегические проблемы и перспективы российской экономики» // Фонд «Развитие и окружающая среда». – 2000 г.
4. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года (от 17 ноября 2008 г. № 1662-р)
5. «Россия, вперед!», статья Д.А. Медведева 10.09.2009.
6. Нигматулин Р.И. Как обустроить экономику России: экономический манифест. – Уфаю – 2003. – 144 с.
7. Сорокин Д.Е. О стратегии развития России // Вопросы экономики. – №8. – 2010.

8. *Сорокин Д.Е.* «Гуманистические традиции отечественной политической мысли и экономическая действительность» // Экономическая наука современной России. – №4. – 2004 г.
9. *Бызов Л.* После смуты // Литературная газета. – 2004. – №18. – С. 3.
10. *Samuelson P.* “International Trade and the Equalization of Factor Pricces” The Economic Journal (June 1949). –PP. 163–184.
11. *Ди У.* Китай: движение к государству инновационного типа. – «Человек и Труд». – № 7. – 2009 г.
12. *Kahneman D., Tversky A.* 1979. «Prospect Theory: An Analysis of Decision Making Under Risk» *Econometrica* 47, no.2: 263–291.
13. *Ахмадуллин Д.Г., Гизатов Н.Р.* Агент-ориентированная модель влияния размера заработной платы на развитие экономики. Ежеквартальный Интернет-журнал «Искусственные общества». – Том 5, номер 1-4, I-IV квартал 2010. – С. 83 – 102.
14. *Зулькарнай И.У., Гизатов Н.Р.* Агент-ориентированная модель влияния размера заработной платы на мотивацию работодателей вводить инновации. Известия Уфимского научного центра РАН. – 2011. – № 2. – С. 98 – 106.
15. *Гизатов Н.Р., Зулькарнай И.У.* Агент-ориентированная модель «Влияние наличия природных ресурсов на инновационный характер экономики». Ежеквартальный Интернет-журнал «Искусственные общества» Том 5, номер 1–4, I–IV квартал 2010. – С. 29–46. <http://www.artsoc.ru/magazine/index.php?ID=85>

# Теория оптимального кризиса, или что кочевнику хорошо...

О.А. Власова.

*Власова Ольга Александровна – доктор, философских наук, профессор кафедры философии Курского государственного университета. Проект РФФИ № 13-06-11522*

По всему миру разбросаны небольшие домашние хозяйства, дома, которые ничем не отличаются от массы других, кроме того, что в них живут не обычные семьи, а люди, объединенные борьбой с психическими расстройствами. Это то, что принято называть терапевтическими сообществами. В мире, особенно в Европе и Америке, их очень много.

История терапевтических сообществ уходит в века: уже во времена Средневековья были известны спонтанные поселения безумцев. В XIV в. в Гиле, в Бельгии появилась легенда о том, что разгневанный король казнил свою дочь вместе с ее возлюбленным на глазах нескольких сумасшедших, и что они были настолько поражены увиденным, что от пережитого вдруг исцелились. Эта легенда стала привлекать паломников, и через некоторое время Гиль стал приютом безумцев: терапевтической коммуной, в которой безумцы вместе выполняли повседневные обязанности [14]. В конце XIX в. в Швейцарии психиатр Ойген Блейлер использует старинный монастырь вдоль Рейна для терапевтического сообщества хронических шизофреников, где персонал и пациенты с семьями ведут совместное хозяйство.

В XX в. такие самоорганизованные группы появляются все чаще и чаще, и начинается развиваться движение тера-

певтических сообществ. Сам термин «терапевтическое сообщество» (*therapeutic community*) в 1946 г. вводит Том Мейн [7], а в 1960-е гг. благодаря радикальности организаторов подобных коммун об этой специфической форме психиатрической помощи узнают по всему миру. За семьдесят лет своего развития терапевтические сообщества сменяют множество образов, но неизменной остается сама идея – идея объединения и совместного избавления от болезни.

## **Пионеры движения:**

### **Максвелл Джонс и эксперименты Нортфилда**

Традиция терапевтических сообществ зарождается в Великобритании после Второй мировой войны в результате интенсивного развития социальной психологии групп. Теоретической базой движения становится положение о том, что социальная группа представляет собой целостный организм, не сводится к сумме входящих в нее членов, и именно в силу этого обладает терапевтической ценностью. Одновременно с социально-психологической платформой появляется социальный запрос на его практическое приложение. Идет Вторая мировая война, и британскую армию захлестывает волна посттравматических неврозов, психиатрия стоит перед необходимостью как-то справиться с этой ситуацией. Традиционные методы не всегда помогают, и возникает потребность в новых, социально-ориентированных.

Пионером практики терапевтических сообществ стал Максвелл Джонс (1907–1990 гг.). Уже в начале своего профессионального пути он открыл для себя, что гораздо больший эффект в психиатрии дает не медикаментозное лечение, а общение больного с группой профессионалов: с командой врачей, сестер и персонала. Так он начинает подозревать, что группа – это основное средство лечения, и скоро ему представляется случай закрепить и использовать свои догадки.

В 1940 г. на базе лондонской Больницы Модсли создаются два военных психиатрических госпиталя, призванных лечить военные неврозы и возвращать солдат на фронт. В одном из них – больнице Милл Хилл – Джонс организует групповые встречи, чтобы пациенты совместными усилиями справились с общей для всех бедой. Он формирует команду персонала, который готов работать по-другому и проводить эти семинары-встречи. В результате пациенты начинают проявлять и собственную активность, строят свободную коммуникацию и помогают друг другу. Через пять лет Джонс развивает эти же методы в отделении реабилитации бывших военнопленных в Южной больнице Дартфорда, в 1947 г. он продолжает этот опыт, заведя отделением техногенных неврозов больницы в Бельмонте, а в 1962 г. становится главным врачом психиатрической больницы Динглтона в шотландском Мелроузе.

Основой функционирования терапевтических сообществ Джонса были малые социальные группы, а инструментом работы – встречи сообщества, которые охватывали все пространства жизни и возможные проблемы [6]. Процесс лечения, т.е. взаимодействия пациента с врачом, не был центральным и единственным пространством жизни. Джонс считал, что пациент должен стать частью сообщества и жить в нем полноценной жизнью, это, по его мнению, и должно было запустить процесс выздоровления и адаптации к большому обществу. Лечение становилось одной из сфер, все из которых

были равно терапевтическими. Использовалась трудовая реабилитация и включение в жизнь большого общества: заключались договоры с различными организациями, фермерскими хозяйствами, расположенными неподалеку, и пациенты могли подрабатывать, возвращаясь к привычной жизни.

Уже в Дантфорте Джонс начал отслеживать эффективность своего подхода. В исследовании ста бывших обитателей больницы, поселившихся в Лондоне, было показано, что 22 из них достигли полного восстановления (чувствовали себя так же, как до войны), состояние 66-ти улучшилось, у 12-ти улучшений замечено не было, точнее, улучшения были заметны во время пребывания в больнице, а после выписки симптомы невроза вернулись. Отслеживались и показатели занятости: 60 бывших пациентов высказывали полное удовлетворение своей нынешней работой.

Удача сопутствовала Джонсу: продвигаясь по карьерной лестнице, он сохранял верность своим идеям и неиссякаемый пыл, с которым он воплощал эти идеи на практике. «К середине 1940-х гг., – вспоминал он позднее, – я обрел твердую убежденность в том, что мы стоим на пороге открытия новой важнейшей терапевтической модели, но тогда я еще не знал, в каком направлении все это будет развиваться, и как я буду со всем этим связан» [3, p. 22].

Практически параллельно с деятельностью Джонса и независимо от нее развивается вторая ветвь движения терапевтических сообществ, которая получила название экспериментов Нортфилда. Они организуются по инициативе британского Министерства здравоохранения в Бирмингеме, в Военном госпитале Нортфилда в 1943–1944 гг. и задумываются как проекты реабилитации фронтовиков, которым не помогали обычные методы. Проектами руководили Уилфред Бийон и Гарольд Бриджер.

Работа основывалась на идее групповой терапии как «управляемой попытки культивирования групповых сил, воплощающихся в успешной групповой деятельности» [2, p.678]. Бийон считал, что малая группа была наиболее полезна в плане терапии: она обеспечивала невротика признание, поддержку, и работа в такой группе вела к излечению. Невроз каждого из солдат должен был стать общим врагом группы, в ходе групповой работы необходимо было понять, как невротическое поведение и невроз влиял на повседневную жизнь, чем он мешал счастью и продуктивной деятельности. В ходе проекта стали явными следующие изменения акцентов: 1) от центрированности на человеке к центрированности на группе, 2) от разговоров к действиям, 3) от управления и директив к спонтанности, 4) от прошлого к ситуации настоящего и др.

Эти два течения – проекты Максвелла Джонса и эксперименты Нортфилда – заложили основания теории и практики движения терапевтических сообществ.

## **Антипсихиатрические коммуны**

В 1960–1970-е гг. терапевтические сообщества переживают эпоху второго рождения, только уже не в традиционном психиатрическом, а в антипсихиатрическом пространстве.

Британская антипсихиатрия (Рональд Лэйнг, Дэвид Купер, Дж. Берк, Л. Мошер, Э. Подволл), противостоя традиционной психиатрии, развивает теорию психического заболевания как «метаноии» – своеобразного «пере-

рождения», личностного кризиса, связанного с глубокой переработкой и преобразованием. Для антипсихиатров психическое расстройство – это временное состояние, которое при грамотном сопровождении может привести к обретению полноценного существования. Следуя этой идее, антипсихиатры начинают организовывать свои сообщества, самым известным из которых стал «Кингсли Холл» – терапевтическая коммуна Рональда Лэйнга, располагавшаяся в восточной части Лондона. Здесь не было ни больных, ни врачей, ни медикаментозного лечения, ни электрошоковой терапии, ни лоботомии. Было лишь живое общение между обитателями. Они говорили о своих переживаниях, обсуждали книги, посещали лекции и семинары.

Кингсли Холл, согласно отчету патронировавшей его Филадельфийской ассоциации, с июня 1965 г. по июнь 1970 г. принял 119 постояльцев, около 65 % из них имели психиатрический диагноз и более чем половина ранее уже проходила стационарное лечение, однако только 9 % из этих 65 % после отъезда из Кингсли Холла были госпитализированы вновь [11]. В ноябре 1965 г. Кингсли Холл принимал в неделю около сотни посетителей и был не просто терапевтическим сообществом, а настоящим контркультурным центром. Однако из-за недостатка средств для оплаты аренды здания в 1970 г. он был закрыт.

Дело Лэйнга было продолжено его последователями и соратниками. Свои сообщества организовали коллеги Лэйнга по Филадельфийской ассоциации – Джозеф Берк и Лорен Мошер.

Терапевтическое сообщество Джозефа Берка «Шатры», образованное в 1973 г., впоследствии выросло в одноименный Кризисный центр. Сообщество располагалось в викторианском здании на севере Лондона и было сравнительно небольшим: одновременно там могли проживать 6–7 клиентов и 2–3 терапевта. Название задано концепцией Центра: как указывают Дж. Берк и его соратники, «Кризисный Центр отталкивался от идеи о том, что личностный кризис может стать осевым моментом как для психического и социального нарушения, так и для продвижения к новым и существенным горизонтам жизни» [1, p. 26].

Суть не только в том, чтобы избавить человека от разрушительного патологического опыта, но и в том, чтобы осмыслить его. В Центр попадают люди, которые не могут больше сдерживать свои мысли, чувства, желания, поступки, поэтому задача персонала – поддержать их и снова научить контролировать себя, а это возможно только путем переоценки и переработки своего внутреннего и внешнего мира. Они должны вновь обрести целостность и автономию, способность взаимодействовать с реальностью, планировать свою жизнь и жить.

Сегодня Кризисный центр «Шатры» продолжает свое функционирование, и объединяет три сообщества, предлагающих терапевтические программы для людей, переживающих эмоциональные, психологические и социальные проблемы.

Самым успешным и самым признанным из всех ближайших соратников Лэйнга оказался Лорен Мошер (1933–2004 гг.), который предпринял попытку отследить эффективность работы сообщества и сохранить его институциональные связи с психиатрией. В апреле 1971 г. Мошер запускает исследовательский проект «Сотерия», открывая одноименное сообщество. «Сотерия» располагалась в небольшом двухэтажном доме в Сан-Хосе. В доме было двенадцать ком-нат, вмещавших одновременно около шести больных, с которыми

круглосуточно находились двое добровольцев, другие добровольцы, психологи, психиатры сменяли друг друга и не проживали в здании постоянно.

Мошер всегда характеризовал этот проект как исследовательский. Как он отмечает в совместной работе с коллегами, «Руководящая для Сотерии философия – это то, что шизофреническая реакция есть измененное состояние сознания человека, переживающего жизненный кризис. Предполагалось, что подрывной психотический опыт несет в себе потенциал для реинтеграции и восстановления, и если этот процесс не будет раньше времени прерван использованием в лечении нейролептиков, он приведет к обретению устойчивого смысла своего «я» [8, p.323]. Проект опирался на парадигму социальной феноменологии, стремясь развить в терапевтическом сообществе нетоталитарные, недирективные и активные эмпатические отношения. Поэтому отношения – это основное терапевтическое пространство «Сотерия».

«Экспериментальная» группа обитателей «Сотерия» сравнивалась с отобранной по аналогичным критериям контрольной группой, которую составляли пациенты обычной местной психиатрической больницы. Результаты первых замеров (1971–1976 гг.), проведенных через шесть недель после начала эксперимента [10], показали, что у пациентов обеих групп наблюдалось улучшение состояния, несмотря на то, что все пациенты контрольной группы получали антипсихотическое лечение (в основном это были нейролептики), а среди обитателей «Сотерия» получавших нейролептики было всего 3 %. Социальные показатели были гораздо лучше, чем в контрольной группе. Те, кто принимал участие в исследовании 1971–1976 гг. (экспериментальная группа по сравнению с контрольной), по показателям за 2 года после выписки, занимали более престижные должности, чаще проживали отдельно или в парах и гораздо реже подвергались повторной госпитализации, при этом 571 против 16-ти в контрольной группе в течение двух лет после выписки ни разу не получали нейролептиков. Второй этап исследования (1976–1982 гг.) только подкрепил результаты первого [9].

Закончился проект «Сотерия» в 1983 г. из-за нехватки финансирования и административных проблем. Однако в мае 1984 г. под руководством профессора социальной психиатрии Люка Сиомпи проект «Сотерия» был возрожден и продолжен в Швейцарском Берне. В 1997 г. в Берне была учреждена Ассоциация «Сотерия», а в 2006 г. проект «Сотерия» был запущен на Аляске.

Не менее любопытным стал и другой проект последователя Лэйнга Эдварда Подволла (1936–2003 гг.) «Уиндхос», запущенный в Боулдере, Колорадо, в 1981 г. [12, p.224]. В основе проекта – критическое отношение к психиатрической больнице как к среде, полностью вырывающей человека из привычного для него окружения. «Уиндхос» базируется на включении человека в состав команды, интеграции его в сообщество, без отрыва его от собственного дома. Клиенты проживали отдельно друг от друга в арендованных домах, вместе с ними жили, как правило, два члена терапевтической команды: они помогали организовать нормальный быт и повседневную жизнь. Параллельно клиенты проходили курс индивидуальной терапии.

Обычная жизнь среди нормальных людей, с нормальными людьми, обычные повседневные занятия – вот тот ресурс, который Подволл и его соратники задействовали в терапевтической работе. Не отрыв от повседневности,

а включенность в повседневность. Поэтому «Уиндхос» – очень дорогостоящий проект, уходящий от типичности и универсальности к единичности – к уникальности ситуации, уникальности личности и уникальности общения.

В целом терапевтические сообщества антипсихиатрии продолжали традицию контркультурных коммун. В противовес жесткой социальной системе, которая не может предоставить человеку в тяжелой жизненной ситуации условий для ее преодоления, коммуны были построены на иной форме отношений между «я» и другими, где устанавливался контакт между внутренним миром личности и окружающим ее миром других людей.

### **Настоящее терапевтических сообществ**

Сегодня движение терапевтических сообществ интенсивно развивается. Действуют всемирная и европейская федерации терапевтических сообществ, издается международный журнал «Therapeutic Communities», проводится международная конференция, и в ноябре 2012 г. была проведена уже двадцать пятая ежегодная встреча. Практика терапевтических сообществ широко распространена и в Америке.

В основном терапевтические сообщества развиваются в двух своих типах: 1) отделения, занимающиеся психологическим лечением и терапией психиатрических пациентов с социальными отклонениями, 2) основанные на идее сообщества терапевтические программы для алкоголиков и наркоманов [5, p.11]. В Европе функционируют в основном терапевтические сообщества первой группы, в Америке традиционно акцентировано второе направление. При любом типе и виде терапевтическое сообщество определяется как пространство, место проживания, «организованное как сообщество, в котором, как ожидается, каждый способствует общей цели создания социальной организации с лечебными свойствами» [13, p.10].

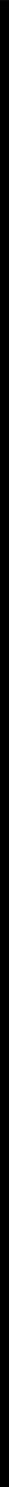
В 1976 г. на конференции «Терапевтических обществ Америки» определяются специфические характеристики терапевтических сообществ. Среди них: совместная проработка проблем; установка на личностное совершенствование; развитие нового социального «я» и самоопределения, установка на реконструкцию жизненного стиля; взаимное доверие, забота, ответственность, честность, самораскрытие, опека; эгалитарная или иерархическая, гостевая или не основанная на совместном проживании структура и проч. [15].

Несмотря на радикальность своих идей, смысл терапевтических сообществ очень точно определяли антипсихиатры, подчеркивая, что их цель – «создать такую ситуацию, в которой люди могли бы взаимодействовать, не нарушая автономии друг друга» [4, p.87]. Первые терапевтические сообщества формировались на базе армейских госпиталей с их жесткой дисциплиной и были инициированы государством. Терапевтические коммуны антипсихиатров, которые следовали свободолобивым идеалам 1960-х, напротив, противостояли государственной и традиционной психиатрии. Однако в истории терапевтических сообществ оказалось, что независимо от того, выступали ли сообщества «за» или «против» традиции или государства, больницы или всей психиатрической системы, одно в них оставалось неизменным – идея сообщества.

Разумеется, что формирование предпосылок развития терапевтических сообществ сопряжено с гуманизацией отношения к психически больным людям, но еще больше оно связано со зрелостью общества, которое способно или неспособно осознать, что решение проблем – в руках самих людей. Сообщество – это то, что обща продвигают сами люди, поэтому, несмотря на выборочную государственную поддержку, все подобные программы формируются и развиваются «снизу»: они поднимаются самими врачами, самими пациентами и их родственниками. Здесь в своем изначальном и идеальном смысле воплощается идея общества – группы людей, которые объединяются, чтобы помочь друг другу, чтобы выжить совместными усилиями, и в которой каждый зависит от другого каждого и, понимая это, максимально вкладывается в групповую динамику. Только такое общество и сообщество может способствовать исцелению, только оно может стать терапевтическим.

### Список литературы:

1. Beyond Madness: PsychoSocial Interventions in Psychosis. Eds. by J.H. Berke, M. Fagan, G. Mak-Pearce, S. Pierides-Müller. London: Jessica Kingsley Publishers, 2002.
2. Bion W.R., Rickman J. Intra-Group Tensions in Therapy: Their Study as the Task of the Group // *The Lancet*. – 1943. – Vol. 242. – 6274. – P. 678–681.
3. Briggs D. The Therapeutic Community. Dialogues with Maxwell Jones. Special Collections. The Library. University of California San Francisco. – 1991.
4. Cooper D. Psychiatry and Anti-Psychiatry. London, New York: Tavistock Publications. – 1967.
5. De Leon G. The Therapeutic Community: Theory, Model, and Method. New York: Springer. – 2000.
6. Jones M. Social Psychiatry. A Study of Therapeutic Communities. London: Tavistock Publications Limited, Routledge and Kegan. – 1952.
7. Main T. The Hospital as a Therapeutic Institution // *Bulletin of the Menninger Clinic*. – 1946. – Vol. 10. – P. 66–70.
8. Matthews S.M., Poper M.T., Mosher L.R., Menn A.Z. A Non-Neuroleptic Treatment for Schizophrenia: Analysis of the Two-Year Postdischarge Risk of Relapse // *Schizophrenia Bulletin*. – 1979. – Vol. 5, № 2. – P. 322–333.
9. Mosher L.R., Menn A. Community Residential Treatment for Schizophrenia: Two-Year Follow-Up // *Hospital and Community Psychiatry*. – 1978. – Vol. 29. – P. 715–723.
10. Mosher L.R., Menn A.Z. Soteria: An Alternative to Hospitalization for Schizophrenia / *Current Psychiatric Therapies*. Ed. by J.H. Masserman New York: Grune and Stratton. – 1974. – Vol. XL. – P. 287–296.
11. Mullan B. Mad to be Normal: Conversations with R.D. Laing. London: Free Association Books. – 1995.
12. Podvoll E. Recovering Sanity: A Compassionate Approach to Understanding and Treating Psychochosis. Boston, Mass.: Shambhala Publications. – 1990.
13. Rappoport R.N. Community as Doctor. London: Tavistock Publications. – 1960.
14. Roosens E. Mental Patients in Town Life: Gell. Europe's Therapeutic Community. Beverly Hills: Sage Publications. – 1979.
15. The Therapeutic Community: Proceeding of the Therapeutic Communities of America, Planning Conference. Eds. G. De Leon, G. Beschner. Rockville, MD: National Institute on Drug Abuse. – 1977.



**ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ  
И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ  
СИСТЕМЫ**

# Системный подход к личной жизни

С.И. Маторин

*Маторин Сергей Игоревич,  
доктор технических наук, про-  
фессор, Белгородский университет  
кооперации, экономики и права, про-  
фессор кафедры Информационных  
систем и технологий.*

*Проект РФФИ № 13-07-11503*

Системный подход – это сначала  
подумать, а потом сделать  
*(Основоположники  
системных исследований)*

Научные статьи, описывающие серьезные исследования и проекты, естественно, посвящены сложным научным или производственным проблемам. На материале таких же проблем, как правило, описывается содержание большой науки и в научно-популярных статьях. Это с полным правом можно отнести к системным исследованиям, содержание которых и в научно-популярной литературе раскрывается, зачастую, например, на процессах создания крупномасштабных хозяйственных комплексов. В этом нет ничего удивительного, так как системный подход, теория систем и системный анализ предназначены для решения сложных, плохо структурированных и плохо формализуемых проблем. Однако явления, происходящие с человеком в процессе его личной жизни, оказываются не менее сложными. Решение личных проблем человека также не может быть найдено формальными средствами. Это позволяет, с одной стороны, применять для решения личных проблем системный подход, а с другой стороны, популярно изложить его понятия и принципы на примерах из личной жизни человека.

## Понятийный аппарат системного подхода.

К сожалению, если необходимо описать или использовать научные знания пусть даже в популярной форме, невозможно обойтись без упоминания хотя бы основных понятий соответствующей научной дисциплины. Какие же понятия необходимо знать, чтобы разобраться, что такое «системный подход» и применять его к решению личных проблем? Прежде чем ответить на этот вопрос, следует уточнить, что в данной статье речь будет идти о системном подходе, основы которого заложены в трудах Г.П. Мельникова и Ю.А. Шрейдера [1, 2]. Данный подход на протяжении ряда лет развивается автором, в том числе, в рамках выполнения проектов, поддержанных грантами РФФИ №08-07-00112а и №10-07-00266а. Основными понятиями, отражающими суть обсуждаемого системного подхода, являются, в частности, следующие понятия.

**Система** – функциональный объект, функция которого обусловлена функцией объекта более высокого яруса (надсистемы).

**Функция системы** – роль, предназначение системы в надсистеме, которая проявляется в наличии функциональных связей рассматриваемой системы с другими системами в данной надсистеме.

**Внешняя детерминанта системы** (функциональный запрос надсистемы) – явление обуславливания функции системы функцией надсистемы. Потребность надсистемы в системе с определенной функцией. Причина существования внутренней детерминанты системы.

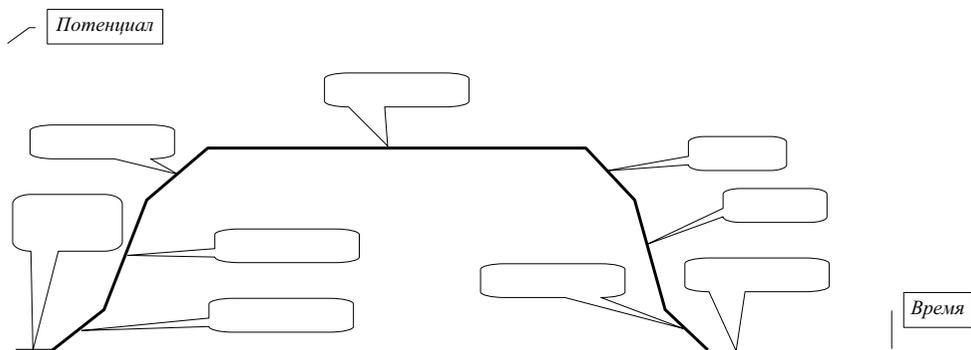
**Внутренняя детерминанта системы** – в действительности проявляемая функция системы, ее функциональная способность.

В соответствии с представленными определениями система поддерживает функциональную способность надсистемы, т.е. находится с ней (надсистемой) в отношении поддержания функциональной способности целого. Более того, система появляется в связи с наличием и для удовлетворения функционального запроса надсистемы. Приближение внутренней детерминанты системы к ее внешней детерминанте представляет собой адаптацию системы к запросу надсистемы. Совершенной или адаптированной является система, у которой внутренняя детерминанта максимально приближена к внешней. При этом очевидно, что надсистема, со своей стороны, «заинтересована» в системе, которая соответствует ее запросу, т.е. которая адаптирована и хорошо ее поддерживает. А в системе, не соответствующей запросу, надсистема «не заинтересована» и, естественно, будет «прилагать усилия» к тому, что бы либо направить систему в нужное русло, либо заменить ее, обеспечивая необходимую поддержку своего функционирования и свою устойчивость.

## Системный подход к анализу жизненного цикла человека.

Разъясним приведенные выше понятия, используя их для анализа и объяснения особенностей жизненных циклов мужчин и женщин.

Жизненный цикл (ЖЦ) любой системы состоит из нескольких этапов. В литературе встречаются разные термины для обозначения этапов ЖЦ системы, но суть их от этого не меняется, что видно из графического представления ЖЦ (см. рис. 1). Естественно у каждого вида систем своя продол-

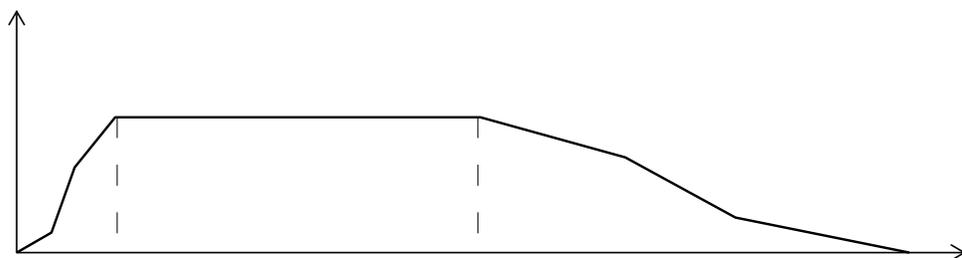


**Рис.1.** Жизненный цикл системы

жительность этапов и свой достигаемый на них потенциал. На *рис.2* и *рис.3* представлены графики ЖЦ среднестатистического мужчины и среднестатистической женщины, иллюстрирующие подтверждаемые статистикой факты более раннего взросления женщин и более быстрого старения мужчин.



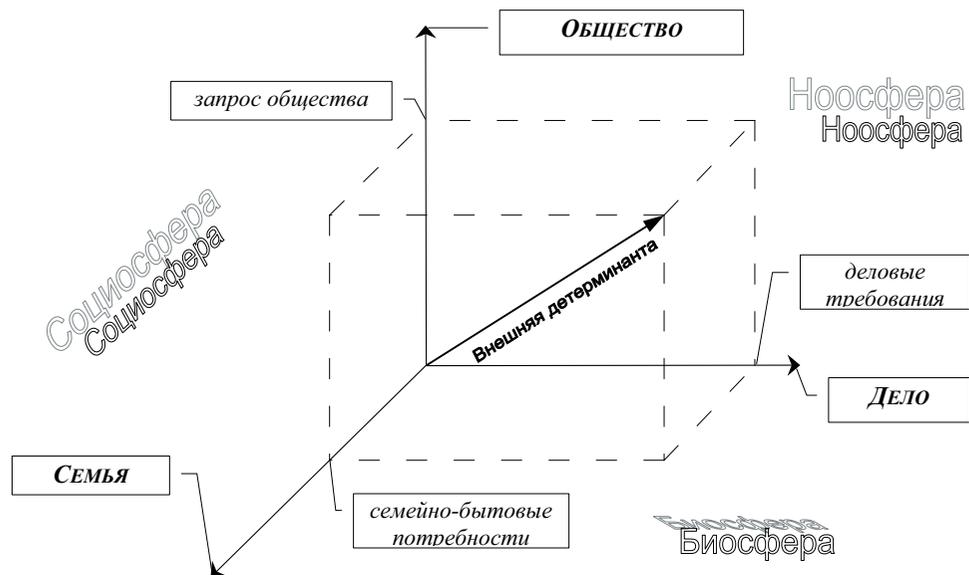
**Рис.2.** Жизненный цикл мужчины



**Рис.3.** Жизненный цикл женщины

Для того чтобы объяснить эти известные из психологии и антропологии факты с помощью упомянутых выше понятий системного подхода, необходимо проанализировать внешние детерминанты системы «Мужчина» и системы «Женщина». Используем для этого представление внешней детерминанты системы «Человек» в виде схемы, изображенной на рис. 4. Данная схема иллюстрирует тот факт, что любая система имеет, как правило, не-

сколько надсистем. Система же «Человек» является частью систем «Семья», «Дело» и «Общество», которые выступают в роли надсистем, выставляющих в системе «Человек» функциональные запросы («семейно-бытовой», «деловой» и «общественный»). Очевидно, что у разных групп людей количественные оценки этих запросов существенно различаются.



**Рис.1.** Векторное представление внешней детерминанты Человека.

Для объяснения различий ЖЦ мужчин и женщин нам необходимо учесть только то обстоятельство, что традиционно (в нашем обществе) у женщин в общем запросе вес «семейно-бытового» функционального запроса, как правило, преобладает, а у мужчин, как правило, преобладает вес «делового» запроса. Это различие запросов, кроме того, естественно, вытекает из физиологических отличий мужчин и женщин.

Из графика ЖЦ на *рис. 1* видно, что система переходит в стабильное состояние после завершения этапа адаптации к функциональному запросу. При этом очевидно, что адаптация к «деловому» запросу процесс длительный, так как требует (особенно в наше время) соответствующей подготовки, которая включает в себя продолжительное обучение, приобретение профессионального опыта и т.д. Адаптация же к требованиям «семейно-бытового» запроса процесс, очевидно, менее длительный с учетом изначального физиологического соответствия женщин этому запросу.

Представленные рассуждения и приводят нас к системному пониманию причин различий левых частей ЖЦ мужчин и женщин, которые статистика констатирует своими средствами. Эти различия, состоящие в опережающем движении женщин к стабильному состоянию и отставании в этом вопросе мужчин, представляют собой системные закономерности для систем

«Мужчина» и «Женщина», обусловленные различием времени адаптации систем к функциональным запросам соответствующих надсистем.

Явления, соответствующие правым частям ЖЦ мужчин и женщин, также обусловлены системными закономерностями, связанными, в данном случае, со снятием функциональных запросов для системы «Мужчина» и для системы «Женщина». Только у мужчин функциональный запрос снимается быстрее, чем у женщин. Это обусловлено, с одной стороны, тем, что снятие «делового» функционального запроса (более существенного для мужчин) после выхода на пенсию является более радикальным, чем снятие «семейно-бытового» (более существенного для женщин). С другой стороны, остатки «семейно-бытового» функционального запроса после взросления детей (например, в виде внуков) мужчинами (дедушками), как правило, воспринимаются в меньшей степени, чем женщинами (бабушками). Таким образом, мужчины вполне закономерно, как правило, движутся в сторону этапа утилизации быстрее, чем женщины.

### **Рекомендации по созданию семьи и продлению жизни.**

Понимание системных закономерностей ЖЦ мужчин и женщин позволяет сформулировать ряд практически полезных для личной жизни человека рекомендаций.

Во-первых, можно обосновать временной промежуток, в котором партнерам имеет смысл создавать семью, вероятность распада которой будет минимальной. В настоящее время, по некоторым оценкам, эта вероятность достигает 80%. И поэтому среди соответствующих специалистов даже обсуждается проблема отмирания института семьи. Хотя, как станет ясно из дальнейшего изложения, проблема состоит всего лишь в том, что семья создается, как правило, без учета системных закономерностей. Во-вторых, можно обосновать системный способ продления жизни человека, действие которого опирается не на случайные факторы (питание, воспитание, экология и т.д.), а на фундаментальные (системные) причины его существования.

По поводу создания семьи заметим, что в соответствии с принципами системного подхода стабильность, устойчивость некоторой системы, создаваемой путем соединения других систем (подсистем), будет зависеть как от взаимодействия подсистем, так и от их собственной стабильности. Следовательно, если необходимо создать семью, вероятность распада которой будет минимальной (т.е. стабильную систему из двух подсистем), то лучше это делать тогда, когда оба партнера находятся на стабильном этапе своего ЖЦ. Если верить статистике, в настоящее время женщины приходят к этому этапу в возрасте 20–25 лет, мужчины – в возрасте 35–40 лет. Это обусловлено всей системой воспитания, образования, трудоустройства, профессионального и карьерного роста, а также психологией современного человека.

Мужчины и женщины с довольно раннего возраста готовы производить потомство, но не сразу готовы к семейной жизни, т.е. к созданию устойчивой системы, выставляющей совершенно новый для них функциональный запрос, так как не достигли собственной стабильности. Массовое создание семей без учета рассмотренной системной закономерности и приводит к массовому их

распаду. По мнению автора, основная ответственность за несоблюдение этих «необходимых условий» должна лечь на плечи мужчин, так как именно они, в настоящее время, чаще всего, вступают в брак, не имея «за душой» ни профессиональной, ни материальной, ни психологической стабильности, а просто идя на поводу сиюминутной чисто физиологической потребности.

По поводу продолжительности жизни заметим, что в соответствии с принципами системного подхода система возникает вследствие наличия функционального запроса и существует, пока для нее существует хоть какой-то функциональный запрос, который она на должном уровне обрабатывает. Т.е., если система существует, то у нее есть один или несколько функциональных запросов, которым она в какой-то степени соответствует. Если это соответствие станет меньше некоторого минимального уровня или функциональные запросы по какой-либо причине будут сняты, то система начнет двигаться в сторону этапа утилизации. Используя именно эту системную закономерность, организационные системы обеспечивают продолжение своего существования путем формирования любыми путями потребности в результатах своей деятельности у клиентов, т.е. путем обеспечения наличия функционального запроса. Эта задача решается, в частности, с помощью рекламы.

Такой же стратегии, только без рекламы, может придерживаться любой конкретный человек. Во-первых, любой человек после выхода на пенсию может начать участвовать в некоторой новой деятельности, в которой он востребован и из которой будет исходить для него новый «деловой» функциональный запрос. Во-вторых, любой человек может завести каким-либо образом новых детей или родственников, которым он будет действительно нужен, т.е. со стороны которых будет исходить для него новый «семейно-бытовой» функциональный запрос. И пока будет реально существовать функциональный запрос на этого человека со стороны надсистемы (или надсистем) и она будет «заинтересована» в человеке, который соответствует ее запросу и хорошо ее поддерживает, будет продолжаться и жизнедеятельность этого человека. Такой подход (системный) к продлению жизни использует саму причину существования человека. Если у человека не будет функционального запроса, все другие способы продления будут все равно бесполезны.

## **Развитие системного подхода.**

Представленное выше понятие системы, как основное понятие системного подхода, может быть уточнено и конкретизировано. Анализ определения системы (см. определение в 1-м пункте) показывает что:

- Во-первых, система всегда является частью некоторой надсистемы, в рамках которой система взаимодействует с другими системами этой надсистемы, т.е. является элементом в структуре и имеет входные и выходные связи.
- Во-вторых, система имеет определенную роль, функцию в надсистеме, суть которой сводится к балансированию узла путем преобразования входных потоков в выходные.
- В-третьих, система является объектом, реализующим функцию и занимающим функциональный узел.

Результаты анализа упомянутого выше определения системы приводят к пониманию того, что любая система представляет собой триединую сущность, объединяющую в себе структурные, функциональные и субстанциальные характеристики. Интеграция этих трех аспектов позволяет представить любую систему как элемент «Узел–Функция–Объект» (УФО-элемент), формализующий три очевидных факта.

- Во-первых, любая система находится в структуре системы более высокого яруса (т.е. надсистемы), исполняя роль ее подсистемы, и, таким образом, может рассматриваться как «Узел».

- Во-вторых, любая система обязательно как-либо функционирует, преобразуя вход в выход, и, таким образом, может рассматриваться как «Функция».

- В-третьих, любая система (если она находится в структуре и функционирует) обязательно существует как реальное материальное или информационное явление и, таким образом, может рассматриваться как «Объект» [3]. Подход «Узел-Функция-Объект» (УФО-подход) конкретизирует обсуждаемый в данной статье системный подход, позволяя применять алгебраические средства для его формализации. В частности, для этого используются теория паттернов Гренандера и исчисление процессов Милнера, что в рамках научно-популярной статьи не рассматривается, однако подробно описано в работах [4–6]. Для использования данного подхода в практике системного анализа разработан оригинальный CASE-инструментарий «UFO-toolkit», который позволяет строить модели сложных систем в терминах «узел», «функция», «объект», т.е. УФО-модели (см. [www.ufo-toolkit.ru](http://www.ufo-toolkit.ru)).

Для задач данной статьи существенно то, что в виде УФО-элементов можно представить явления самой разной природы и применить, таким образом, УФО-подход для анализа в самых различных предметных областях. Например, в таблице 1 показан ряд явления разной природы, которые могут быть представлены в виде элементов «Узел-Функция-Объект».

**Таблица 1.** Различные явления как УФО-элементы

	<b>Человеческие потребности</b>	<b>Причинно-следственные отношения</b>	<b>Следственная деятельность</b>	<b>Проектирование</b>
<b>УЗЕЛ</b>	<i>Желания</i>	<i>Причина</i>	<i>Мотив</i>	<i>Анализ Формулирование требований</i>
<b>ФУНКЦИЯ</b>	<i>Возможности</i>	<i>Условия</i>	<i>Отсутствие алиби</i>	<i>Проектирование</i>
<b>ОБЪЕКТ</b>	<i>Действительность</i>	<i>Следствие</i>	<i>Вещественные доказательства</i>	<i>Реализация</i>

Кроме того, любая организационная система полностью описывается тремя характеристиками: узловой, функциональной и объектной.

- Во-первых, каждая организационная система как структурный элемент системы более высокого яруса (вышестоящей организации, рынка в целом и т.д.) характеризуются определенными видами связей с другими системами. Если связи отсутствуют, то данную систему вообще не имеет смысла рассматривать. При этом вышестоящей организации или рынку любая конкретная система в целом представляется перекрестком, т.е. узлом связей, по которым что-либо поступает к ней («втекает») от других и что-либо поступает от нее («вытекает») к другим. Таким образом, учитывается, что любая организационная система обязательно является и потребителем каких-то видов ресурсов (материальных и информационных) других систем, и поставщиком каких-то видов ресурсов для других систем. Качественная узловая характеристика организационной системы является основной и характеризует ее целостно как элемент (подсистему) системы более высокого яруса.

- Во-вторых, с точки зрения втекающих и вытекающих потоков/связей, каждая организационная система характеризуется функциональными способностями (бизнес-процессами), обеспечивающими преобразование «втекающих» по связям ресурсов в «вытекающие» ресурсы. Эти способности (процессы) обеспечивают баланс «притока» и «оттока» по функциональным связям узла, занимаемого данной системой. При этом баланс одного и того же узла может быть обеспечен, в принципе, разными наборами функциональных способностей (наборами процессов), т.е. разными функциональными зависимостями выхода от входа. Формальная функциональная характеристика организационной системы является второстепенной и характеризует теоретическую способность (потенциальную возможность) системы сбалансировать определенный узел.

- В-третьих, с точки зрения функциональных способностей балансировать определенный узел, каждая организационная система – это материальный объект, реализующий эти функциональные способности (функциональные зависимости), т.е. физически осуществляющий эти процессы. При этом один и тот же набор функциональных способностей может быть реализован, в принципе, различными по своей природе и конструкции объектами. Необходимо только, чтобы производительности этих объектов по входу и выходу соответствовали количественным характеристикам втекающих и вытекающих потоков объектов, связанных с данной организационной системой. Количественная объектная характеристика организационной системы является третьестепенной и характеризует практическую действительную способность системы сбалансировать определенный узел.

### **Уточнение рекомендаций по созданию семьи.**

Используя системный УФО-подход можно уточнить сформулированные выше рекомендации по созданию семьи, которые предлагается рассматривать как «необходимые условия». Для того чтобы сформулировать «достаточные условия», рассмотрим семью как разновидность организационной системы, что не противоречит законодательству о браке и семье. Дело в том,

что семья для государства, согласно законодательству, является, в первую очередь, хозяйственной ячейкой общества, т.е. организационной системой.

Рассмотрим процедуру приема на работу на вакантную должность так, как это делается в настоящее время в солидных фирмах в соответствии с рекомендациями современных рекрутинговых консалтинговых компаний. При отборе кандидатов в таком случае осуществляется в первую очередь анализ желаний кандидата для выяснения причин, по которым он предлагает себя в качестве работника на данной должности в данной фирме. И только потом анализируются его возможности с точки зрения требований данной вакантной должности. Т.е. прежде чем выяснять возможности кандидата по выполнению «делового» функционального запроса со стороны вакантной должности в конкретной фирме, выясняются его желания выполнять именно этот запрос и причины их существования. Данные причины могут быть самыми различными и совершенно ясно, что они могут существенно сказываться на результатах деятельности независимо от квалификации кандидата. Например, желание работать в данной должности на данной фирме может быть обусловлено тем, что «а больше нигде» или «удобством территориального расположения фирмы к месту жительства кандидата», а может быть обусловлено внутренними стремлениями кандидата к такому виду деятельности и приверженностью (а может, и любовью) к данной фирме. Возможности кандидата, конечно, проверяются различными способами, но в первую очередь выясняются его желания решать проблемы фирмы, жить ими. Иначе можно принять на работу квалифицированного, но не надежного сотрудника, который уйдет к конкурентам при первой возможности. Таким образом, с точки зрения системного подхода сначала анализируются узловые характеристики кандидата, а потом – функциональные. И только их общая удовлетворительная оценка позволяет кандидату стать объектом, занимающим ранее вакантный узел (должность) в структуре фирмы.

Процедуру создания семьи можно рассматривать как симметричную процедуру приема партнерами кандидата на вакантную должность жены и\или мужа. И следовательно, применить к этой процедуре тот же системный подход «Узел-Функция-Объект». В соответствии с этим подходом, как показано в приведенном выше примере приема на работу, необходимо сначала оценивать узловые характеристики кандидата, т.е. его желания решать проблемы семьи, удовлетворять требования партнера, а затем и возможности это делать.

Данный подход предлагает по-новому посмотреть на известную шутку о том, что брак по расчету может быть счастливым, если расчет правильный. Если в расчете учтены узловые характеристики кандидата и выявлены его желания путем создания семьи решать не свои собственные проблемы, а проблемы партнера, то, другими словами, учтены правильные отношения между людьми, а не только отношения между полами. Т.е. учтена настоящая любовь данного кандидата к партнеру. Примечательно, что это соответствует определению любви Э. Фроммом: «Любовь – это желание счастья объекту любви и деятельность по обеспечению этого счастья» [7]. Если при этом анализ функциональных возможностей кандидата показывает, что он

может выполнить функциональный запрос партнера, то тогда «достаточные условия» для создания семьи, с точки зрения данного партнера, оказываются выполненными. Эти условия должны быть выполнены с обеих сторон.

По мнению автора, за несоблюдение, как правило, описанных выше «достаточных условий» создания семьи ответственность в основном ложится на женщин, которые зачастую стремятся замуж, не обращая внимания ни на какие жизненные обстоятельства и особенности своего партнера.

Таким образом, использование системного подхода и, в частности, учет «необходимых и достаточных условий» создания семьи, позволит избавиться человеку от многих личных проблем и значительно сократит количество разводов.

### **Литература.**

1. Мельников Г.П. Системология и языковые аспекты кибернетики. – М.: Сов. радио, 1978. – 368 с.
2. Шрейдер Ю.А., Шаров А.А. Системы и модели. – М.: Радио и связь, 1982. – 152с.
3. Маторин С.И., Попов А.С., Маторин В.С. Моделирование организационных систем в свете нового подхода «Узел-Функция-Объект» // НТИ. Сер. – 2. – 2005. – №1. – С. 1–8.
4. Маторин С.И., Ельчанинов Д.Б. Применение теории паттернов для формализации системологического УФО-анализа // НТИ. Сер.2. – 2002. – №11. – С. 1–11.
5. Жихарев А.Г., Маторин С.И. Метод формализации организационных знаний // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2011. – №2. – С. 12–18.
6. Зимовец О.А., Маторин С.И. Интеграция средств формализации графо-аналитических моделей «Узел-Функция-Объект» // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2012. – №1. – С. 95–102.
7. Фромм Э. Искусство любить. Исследование природы любви / Перевод Л.А. Чернышёвой. – М.: Педагогика, 1990. – 160 с.

# Обзор проблемы построения последовательностей Баркера

А.Н. Леухин

*Анатолий Николаевич Леухин, проректор по научной работе и инновационной деятельности, доктор физико-математических наук. ФГБОУ ВПО «Марийский государственный университет» теория информации и кодирования, синтез, анализ и цифровая обработка сложных сигналов Проект РФФИ № 13-07-11505*

## Аннотация

Одной из классических проблем синтеза последовательностей с хорошими корреляционными свойствами, возникших в начале 1950-х гг. и до сих пор считающейся не решенной, является проблема построения последовательностей Баркера с уровнем боковых лепестков импульсной автокорреляционной функции, не превышающим единицу. Такие последовательности являются оптимальными с позиции достижения минимального уровня бокового лепестка импульсной автокорреляционной функции, что делает их потенциально наилучшими при решении ряда важнейших практических задач. Например, в радиолокации при обнаружении целей с малой эффективной площадью рассеяния на фоне целей с большой эффективной площадью рассеяния, в экспериментальной физике и химии при исследовании структуры вещества с высоким разрешением в пространстве и времени, в системах синхронизации и автоматике, в связных и радионавигационных системах. Однако, несмотря на острую потребность в последовательностях Баркера с практической точки зрения и привлечение к решению задачи синтеза многофазных последовательностей Баркера огромного количества специалистов в соответствующих областях

знаний, ответ на принципиальный вопрос о существовании кодов Баркера для любой длины до сих пор остается открытым.

Данная статья посвящена обзору основных достижений в области построения последовательностей Баркера, включая последние результаты, в том числе, авторские, полученные в ходе выполнения ряда проектов, поддержанных РФФИ: проект № 07-07-00285-а, № 09-07-00072-а, № 12-07-00552-а.

### Бинарные последовательности Баркера

Работы в области построения последовательностей Баркера, начиная с работы 1953 г. [1], не прекращаются по сей день. С позиций помехоустойчивости фазоманипулированные последовательности с наименьшим числом градаций фаз являются предпочтительными. К сожалению, бинарных последовательностей Баркера (с двумя значениями фаз) длин больших не найдено. Причем, в работе Турина в 1963 г. [2] аналитически было доказано, что бинарных последовательностей Баркера нечетных длин не существует.

В работе 2009 г. Моссингоффа [3] была увеличена верхняя граница для последовательностей четных длин до значения, ниже которой доказано, последовательностей Баркера с длинами из практически значимого диапазона не существует (за исключением возможной длины).

Полный список бинарных последовательностей Баркера представлен в *таблице 1*.

**Таблица 1.** Бинарные последовательности Баркера

Длина	Последовательность
N=1	{1}, {-1}
N=2	{1,1}, {1,-1}, {-1,1}, {-1,-1}
N=3	{1,1,-1}, {1,-1,-1}, {-1,1,1}, {-1,-1,1}
N=4	{1,1,1,-1}, {1,1,-1,1}, {1,-1,1,1}, {1,-1,-1,-1}, {-1,1,-1,-1}, {-1,-1,1,-1}, {-1,-1,-1,1}
N=5	{1,1,1,-1,1}, {1,-1,1,1,1}, {-1,1,-1,-1,-1}, {-1,-1,-1,1,-1}
N=6	{1,1,1,-1,-1,1}, {1,-1,1,1,-1,-1}, {-1,1,-1,-1,1,1}, {-1,-1,-1,1,1,-1}
N=7	{1,1,1,-1,-1,-1,1,-1,-1,-1}, {1,-1,1,1,-1,1,1,-1,-1,-1}
N=11	{1,1,1,-1,-1,-1,1,-1,-1,-1,-1}, {1,-1,1,1,-1,1,1,1,-1,-1,-1}, {-1,1,-1,-1,1,-1,-1,-1,1,1,1}, {-1,-1,-1,1,1,1,-1,1,1,-1,1}
N=13	{1,1,1,1,1,-1,-1,1,1,-1,1,-1,-1}, {1,-1,1,-1,1,1,-1,-1,1,1,1,1}, {-1,1,-1,1,-1,-1,1,1,-1,-1,-1,-1,-1}, {-1,-1,-1,-1,-1,1,1,-1,-1,1,-1,1,-1}

## Многофазные последовательности Баркера

Следующим шагом в развитии подходов к построению кодов Баркера явилась идея использовать алфавит с большим объемом по сравнению с бинарным. В 1956 г. де Лонгом [4] были построены трехфазные последовательности Баркера, а затем Карлеем [5] и Велти [6] в 1960 г. четырехфазные последовательности Баркера. Окончательно законченный вид идея увеличения объема алфавита для построения последовательностей Баркера была подчеркнута в 1965 г. Голомбом и Шольцем в работе [7]. Голомбом и Шольцем было введено понятие обобщенных кодов Баркера, определяемых в виде многофазной последовательности  $\Gamma = \{\gamma_n\}_{0,N-1}$  (1)

$$\gamma_n = \exp(i\varphi_n) \quad n = 0, \dots, N-1,$$

где значение фазы на каждом  $n$ -ом кодовом интервале определяется из диапазона  $\varphi_n \in [0, 2\pi]$ ,

$N$  – длина дискретной последовательности (количество кодовых элементов в последовательности),  $i$  – мнимая единица.

Удобным способом представления многофазных (обобщенных) последовательностей Баркера является представление в виде фазового вектора

$$\Psi = [\varphi_0 = 0 \quad \varphi_1 = 0 \quad \varphi_2 \dots \varphi_{N-1}], \quad (2)$$

где неизвестными являются углы поворотов элементов кода  $\varphi_2, \dots, \varphi_{N-1}$ . Отметим, что фазы нулевого и первого кодовых элементов без ограничения общности решения задачи можно положить равными нулю, т.е.  $\varphi_0 = \varphi_1 = 0$ . Последовательности Баркера с начальными фазами  $\varphi_0 = \varphi_1 = 0$  названы нормированными последовательностями Баркера.

Учтем, что вид ИАКФ последовательности  $\Gamma = \{\gamma_n\}_{0,N-1}$  не изменится, если использовать следующие 4 преобразования эквивалентности, рассмотренные в работе [7]:

а) поворот всей последовательности на угол  $\Delta\varphi$

$$\varphi_0^{(\text{eqv})} = \varphi_n + \Delta\varphi \quad n = 0, \dots, N-1. \quad (3)$$

б) сопряжение

$$\varphi_0^{(\text{eqv})} = -\varphi_n \quad n = 0, \dots, N-1 \quad (4)$$

в) реверсия

$$\varphi_0^{(\text{eqv})} = -\varphi_{N-n-1} \quad n = 0, \dots, N-1 \quad (5)$$

г) набег фазы на угол  $\pm$

$$\varphi_0^{(\text{eqv})} = \varphi_n + n \cdot \Delta\varphi \quad n = 0, \dots, N-1. \quad (6)$$

Последовательность  $\Gamma^{(\text{eqv})} = \{\gamma_n^{(\text{eqv})}\}_{0,N-1} = \{\exp(i, \varphi_n^{(\text{eqv})})\}_{0,N-1}$  полученная в результате преобразований (3)–(6), образует класс эквивалентности.

Наряду с оригинальными (бинарными) последовательностями Баркера ( $\gamma_n = \pm 1$ ) в работе [7] Голомбом и Шольцом рассмотрены  $M$ -фазные последовательности Баркера с рациональными фазами вида

$$\gamma_n = \exp\left(i \frac{2\pi}{M} n \cdot r\right) \tag{7}$$

$M$  – количество градаций фаз, задающее число разбиений окружности на  $M$  равных частей,  $r \in [0, 1, \dots, M-1]$ .

В частности, в работе [7] приводятся ссылки на  $M=2,3,4$  - фазные последовательности Баркера, а также впервые рассмотрены ( ) шестифазные последовательности Баркера. В **таблице 2** приведено по одному примеру  $M=4$  - фазных последовательностей Баркера.

**Таблица 2.** Четырехфазные последовательности Баркера

Длина $N$	Последовательность
$N=1$	{1}, {-1}
$N=2$	{1, $i$ }
$N=3$	{1, $i$ , 1}
$N=4$	{1, $i$ , - 1, $i$ }
$N=5$	{1, $i$ - 1, $i$ , 1}
$N=7$	{1, $i$ , - 1, $i$ - 1, $i$ , 1 }
$N=11$	{1, $i$ - 1, $i$ , - 1, $i$ - - 1, $i$ - 1, $i$ , 1}
$N=13$	{1, $i$ - 1 - $i$ , 1, - $i$ , 1 - $i$ , 1 - $i$ - 1, $i$ , 1}
$N=15$	{1 - 1, 1, $i$ - $i$ , - 1, $i$ , - $i$ - $i$ , 1, $i$ , $i$ , 1, 1, 1}

Из **таблицы 2** следует, что увеличение объема алфавита позволяет увеличить длину последовательностей Баркера в частности, для четырехфазных последовательностей Баркера максимальная возможная длина становится равной  $N=15$

Также в работе [7] Голомб и Шольц сформулировали вопрос: «Чему равняются все значения  $M$  для заданной длины  $N$  такие, что последовательности Баркера могут быть сконструированы символами алфавита  $A_M$  ?». Другие различные аспекты по вопросам построения мно-гофазных последовательностей Баркера были рассмотрены Голомбом с соавторами в течение последующих 30 лет в работах [7–15].

Поиски ответа на поставленный вопрос привели в дальнейшем к следующему результату. В *таблице 3* представим общее число нормированных обобщенных последовательностей Баркера для малых объемов алфавита  $M = [2, 3, \dots, 12]$ , взятых из работы 2007 г. [16].

**Таблица 3.** Число нормированных обобщенных последовательностей Баркера

$N/M$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
6	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	7	0	6	6	12	7	64
8	0	0	0	0	9	1	4	5	10	6	72
9	0	2	0	1	18	4	17	37	72	73	367
10	0	0	0	0	11	0	1	2	7	0	99
11	1	0	1	0	7	0	3	1	12	2	92
12	0	0	0	0	3	0	1	0	0	0	9
13	1	0	1	0	9	0	3	0	14	3	156
14	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	9
15	0	0	1	0	1	0	1	0	4	0	47
16	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	7
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
18	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1

В 1989 г. Голомбом и Жанг в работе [8] были построены  $M=60$ -фазные последовательности Баркера до длины  $N=19$ .

При малых объемах алфавита  $M$  и сравнительно малых длин  $N$  поиск  $M$ -фазных последовательностей Баркера можно проводить, используя переборные методы. Однако с увеличением объемов алфавита и с увеличением длин дальнейший поиск  $M$ -фазных последовательностей Баркера становится нецелесообразным, вместо этого переходят к поиску унимодулярных последовательностей Баркера с неограниченным объемом алфавита, т.е.  $\varphi_n \in [0, 2\pi]$ .

Дальнейшие усилия в поиске последовательностей Баркера привели к следующим результатам. В 1994 г. список последовательностей Баркера был расширен до длины  $N=31$  [17].

В 1996 г. в работе [18] были найдены многофазные коды Баркера до длины  $N=36$ . В работе [19] в 1998 г. построены многофазные коды Баркера до длины  $N=45$ . В 2005 г. в работе [20] построены многофазные коды Баркера до длины  $N=63$ , а в работе [21] построены многофазные коды Баркера длины  $N=64$ . В 2007 г. в работе [16] построены многофазные последовательности длины  $N=65$ . Многофазные последовательности Баркера с наибольшими на сегодняшний день длинами были получены в 2009 г. в работе [22]  $65 \leq N \leq 70$ ,  $N = 72$ ,  $N = 76$ ,  $N = 77$ .

### Заканчиваются ли последовательности Баркера, начиная с определенной длины?

Ключевым вопросом в проблеме построения многофазных последовательностей Баркера является вопрос – существуют ли многофазные последовательности Баркера для любой произвольной длины  $N$ ? Если длина ограничена, то чему равна максимальная длина  $N$  многофазной последовательности Баркера?

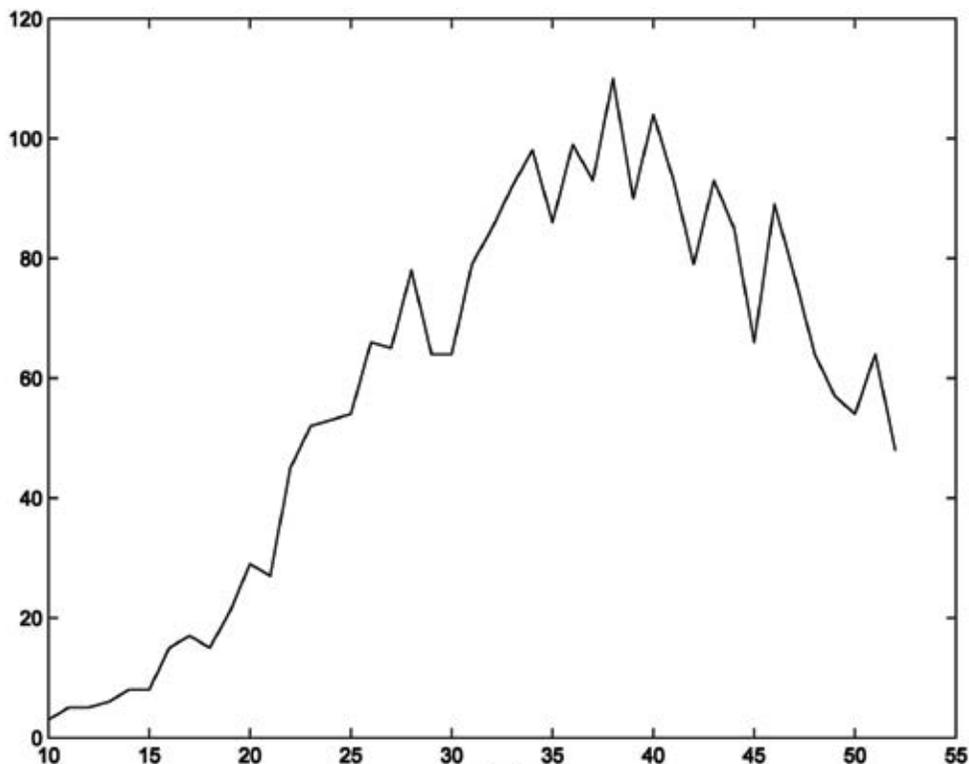


Рис.1. Количество известных из работ [20,22] многофазных последовательностей Баркера длин  $N=10..52$

Некоторые из авторов работ, например, [17–22] по результатам экспериментального поиска пришли к выводу, что многофазные последовательности Баркера существуют лишь для некоторой конечной длины  $N$ .

Авторы работы [22], синтезировавшие самые длинные на сегодняшний день многофазные последовательности Баркера ( $N=77$ ), провели детальное построение в диапазоне длин  $N= [10; 52]$ . В результате при длине  $N=38$  ими было построено 110 неэквивалентных нормированных многофазных последовательностей Баркера (*рис. 1*).

По резкому характеру уменьшения числа найденных последовательностей при возрастании длины  $N$  ими было высказано предположение, что в скором времени будут найдены все длины, при которых существуют многофазные последовательности Баркера.

В работе [23] напротив на основании не доказанного постулата Голея о «математической эргодичности» аргументируется, что для больших длин  $N$   $M$ -фазные коды Баркера должны существовать при условии градаций фаз  $N \geq M$ .

Отметим также еще два результата в области построения многофазных последовательностей со свойствами импульсной автокорреляционной функции, близкой к свойствам многофазных последовательностей Баркера.

В работе Седлецкого 2011 г. [24] приведены многофазные последовательности с четными длинами до  $N=200$ , со свойствами импульсной автокорреляции, близкими к свойствам последовательностей Баркера: все отсчеты ИАКФ у таких последовательностей, кроме сдвига  $\tau = 0, 1, 2$  меньше единицы (у последовательностей Баркера все отсчеты ИАКФ, кроме нулевого сдвига  $\tau = 0$  меньше единицы).

В работе Быстрова и Жуковой [25] сообщается о численном методе генерации многофазной последовательности длины  $N=200$  со значением максимального бокового лепестка ИАКФ, не превышающим 1,7.

### **Новые эксперименты в пользу гипотезы существования многофазных последовательностей Баркера произвольной длины**

Под руководством автора работы был выполнен ряд экспериментов по поиску многофазных последовательностей Баркера в диапазоне длин  $N=2,3,\dots,52$ . Цель экспериментов заключалась в проверке количества найденных многофазных последовательностей Баркера, опубликованных в работе [22] и представленных на *рис. 1*. Для достижения поставленной цели был разработан новый метод построения многофазных последовательностей Баркера [26–30], основанный на аналитическом задании начальных условий численного решения необходимой системы нелинейных уравнений.

В результате синтеза многофазных последовательностей Баркера были получены следующие результаты. В диапазоне длин  $N= 3,\dots,10$  аналитически были найдены все многофазные последовательности Баркера с равномерным уровнем импульсной автокорреляционной функции (все боковые лепестки равны 1). В диапазоне длин  $N= 11,\dots,34$  численными методами были найдены многофазные последовательности Баркера с равномерным уровнем импульсной автокорреляционной функции, а в диапазоне длин  $N=31,\dots,52$

построены последовательности Баркера с рельефом автокорреляционной функции, близким к равномерному. Поиск последовательностей во всем рассмотренном диапазоне длине продолжался до тех пор, пока число неэквивалентных новых многофазных последовательностей Баркера не станет превышать в несколько раз число найденных последовательностей в работе [22]. Например, в диапазоне длин  $N = [30, 45]$  число построенных неэквивалентных последовательностей Баркера превышало 1000.

Количество новых синтезированных многофазных последовательностей Баркера с равномерной автокорреляцией длин представлено в *таблице 4*.

**Таблица 4.** Количество синтезированных многофазных последовательностей Баркера длин  $N = 3, \dots, 34$  с единичным уровнем боковых лепестков

$N$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$P$	1	2	6	1	18	36	40	120	132	84	402	164	368	220	140
$N$	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
$P$	114	112	176	188	140	408	108	404	64	64	50	78	98	76	8
$N$	33	34													
$P$	4	8													

Количество новых синтезированных многофазных последовательностей Баркера с почти равномерной автокорреляцией длин  $N = 31, \dots, 52$  представлено в *таблице 5*.

**Таблица 5.** Количество синтезированных многофазных последовательностей Баркера длин  $N = 31, \dots, 52$  с почти равномерным уровнем боковых лепестков

$N$	$P$	$N$	$P$	$N$	$P$	$N$	$P$	$N$	$P$
31	3015	36	1286	41	1024	46	134	51	118
32	2180	37	1593	42	1097	47	129	52	116
33	1337	38	2082	43	1011	48	132		
34	2232	39	1277	44	1115	49	120		
35	1356	40	1087	45	1032	50	140		

Спад в количестве найденных решений, начиная с длины  $N=46$ , объясняется лишь увеличением вычислительной сложности работы алгоритма с ростом  $N$ . Поэтому в диапазоне длин  $N=[46, 52]$  эксперименты продолжались до тех пор, пока количество найденных много-фазных последовательностей Баркера не будет превышать 100.

Полученные результаты в области синтеза кодов Баркера обсуждались на Международной конференции “*Sequences and their applications (SETA-2012)*” с профессором С. Голломбом, введшим понятие обобщенных последовательностей Баркера (*рис.1 цветной вкладки*).

### **Заключение.**

Статья содержит краткий исторический обзор основных результатов, полученных при решении одной из сложнейших и старейших задач теории синтеза последовательностей с оптимальными корреляционными свойствами – задачи синтеза многофазных последовательностей Баркера. Новые результаты экспериментального поиска многофазных последовательностей косвенным образом подтверждают гипотезу, что многофазные последовательности Баркера существуют для любого значения длины  $N$ .

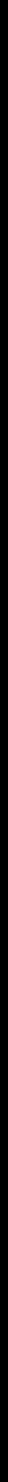
### **Литература**

1. *Barker R.H.* Group Synchronizing of Binary Digital Systems// Communication Theory, London, 1953. – PP.273–287.
2. *Turyn R.* Sequences with small correlation. Error correcting codes. – New York, John Wiley and Sones, 1968.
3. *Mossinghoff M.J.* Wieferich pairs and Barker sequences// Designs, Codes and Cryptography, 53, no. 3. – 2009. – PP.149–163.
4. *De Long D.F. Jr.* Three-Phase Codes, MIT Lincoln Laboratory, Lexington, Massachusetts, Group Report, July 24. – 1959. – PP.47–48.
5. *Carley G.* Unpublished report.
6. *Welti G.R.* Quaternary Codes for Pulsed Radar// IRE Transaction on Information Theory. – June 1960, vol. IT-6, no.3.
7. *Golomb S.W., Scholtz R.A.* Generalized barker sequences// Trans. on Inf. Theory, 1965, vol. 11, no. 4. – PP. 533–537.
8. *Zhang N., Golomb S.W.* Sixty-phase generalized Barker sequences// IEEE Trans. on Inf. Theory. – 1989, vol. 35, no. 4. – PP. 911–912.
9. *Zhang N., Golomb S.W.* A Limit Theorem for n-Phase Barker Sequences// IEEE Trans. on Inf. Theory, July 1990, vol. IT-36, no. 4. – PP. 863–866.
10. *Zhang N., Golomb S.W.* Uniqueness of the Generalized Barker Sequence of Length 6 // IEEE Trans. on Inf. Theory, September 1990, vol. IT-36, no. 5. – PP. 1167–1170.
11. *Zhang N., Golomb S.W.* On the crosscorrelation of generalized Barker sequences // IEEE Trans. on Inf. Theory, 1990, vol. 36, no. 6. – PP. 1478–1480.
12. *Zhang N., Golomb S.W.* N-Phase Barker Sequences// 1990 International Symposium on Information Theory and Its Applications, November 27–30, 1990, Honolulu, Hawaii.

13. Golomb S.W., Zhang N. On n-phase Barker sequences// IEEE Trans. on Inf. Theory, 1994, vol. 40, no. 4. – PP. 1251–1253.
14. Golomb S.W. Roots of Polynomials Corresponding to Generalized Barker Sequences// Seventh Joint Swedish-Russian International Information Theory Workshop Lahta, Russia, June, 1995.
15. S.W.Golomb, N.Chang. 7200-phase Generalized Barker Sequences// IEEE Trans. on Inf. Theory, vol. IT-42, no. 4, July, 1996. – PP. 1236–1238.
16. Borwein P., Ferguson R. Barker sequence, May 31 to June 3, 2007, poster presented at CMS-MITACS Joint Conference, Winnipeg, Manitoba.
17. Friese M., Zottmann H. Polyphase Barker sequences up to length 31// Electronics Letters, November 1994, V. 30, № 23. – PP. 1930–1931.
18. Friese M. Polyphase Barker sequences up to length 36// IEEE Transactions on Information Theory, July 1996, V. 42, № 4. – PP. 1248–1250.
19. Brenner A.R. Polyphase Barker sequences up to length 45 with small alphabets// Electronics Letters, August 1998, vol. 34, № 16, pp. 1576–1577.
20. Borwein P.B., Ferguson R.A. Polyphase sequences with low autocorrelation// IEEE Trans. Inform. Theory, 2005, V. 51. – PP. 1564–1567.
21. Nunn C.J. Constrained optimization applied to pulse compression codes, and filters//Proceedings of the 2005 IEEE International Radar Conference, Washington, D.C., 190–194.
22. Nunn C.J, Coxson G.E. Polyphase pulse compression codes with optimal peak and integrated sidelobes// IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems, 2009, Vol. 45, No. 45. – PP. 775–781.
23. Ein-Dor L., Kanter I., Kinzel W. Low autocorrelated multiphase sequences // Phys. Rev. E (Statistical, Nonlinear and Soft Matter Physics), February 2002, Vol. 65, No. 2. – PP. 020102/1–020102/4.
24. Sedletsky R. Even Polyphase Barker Codes with Large Alphabet // International Radar Symposium IRS 2011, Sept. 2011, pp.571-576.
25. Быстров Н.Е., Жукова И.Н., Чеботарев Д.В.. Синтез многофазных импульсных сигналов методом нелинейной оптимизации// Известия ВУЗов России. Радиоэлектроника, 2009, вып. 6. – С. 19–23.
26. Леухин А.Н. Импульсные фазокодированные последовательности с единичным уровнем боковых лепестков//Изв. Вузов России. Радиоэлектроника, 2009, вып. 6. – С. 13–18.
27. Леухин А.Н. Многофазные импульсные последовательности с /Леухин А.Н., Шувалов А.С., Петухов А.С.// Вестник Марийского государственного технического университета: Серия радиотехнические и инфокоммуникационные системы, 2010, №2. – С. 77–90.
28. Леухин А.Н. Оптимальные импульсные последовательности // Вестник МарГТУ. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы», 2012, №1. – С.37–46/ А.Н. Леухин, А.С. Шувалов, Е.Н. Потехин, А.В. Харитонов.
29. Шувалов А.С. Новый алгоритм поиска оптимальных многофазных последовательностей Баркера// Вестник ПГТУ. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы», 2012, №2 (16). – С. 19–23/ А.С. Шувалов, А.Н. Леухин, Д.М. Гайворонский.

30. *Леухин А.Н.* Многофазные последовательности Баркера// Ученые записки физического факультета МГУ: Труды 13-ой Всероссийской школы-семинара «Волновые явления в неоднородных средах», Секция 10 – Нелинейная динамика, 2013, №1. – С.24–25/ А.Н.Леухин, А.С.Шувалов, В.О.Виноградов.

31. <http://signalslab.vlgatech.net>.



**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ  
ОСНОВЫ  
ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК**

# Генерация мощных ионных пучков

А.И. Пушкарев, Ю.И. Исакова., И.П. Хайлов

*Пушкарев Александр Иванович,  
доктор физико-математических  
наук, ведущий научный сотрудник  
Томского политехнического универ-  
ситета*

*Исакова Юлия Ивановна,  
инженер Томского политехническо-  
го университета*

*Хайлов Илья Павлович,  
инженер-исследователь Томского  
политехнического университета  
Проект РФФИ № 13-08-11501*

Приведен аналитический обзор работ по генерации мощных ионных пучков и результаты экспериментальных исследований ионного пучка гигаватной мощности, формируемого диодом со взрывоэмиссионным катодом в режиме магнитной самоизоляции. Взрывная эмиссия обеспечивает формирование плотной плазмы на всей рабочей поверхности катода. В таких условиях характеристики диода не зависят от эмиссионной способности электрода, что позволяет изучать фундаментальные процессы при генерации ионно-го пучка по вольтамперным характеристикам диода с высоким временным разрешением. Выполнены исследования подавления электронной компоненты полного тока диода, усиления плотности ионного тока и статистический анализ генерации ионного пучка. Получено, что в серии импульсов стандартная девиация плотности энергии пучка не превышает 10–11% при нестабильности амплитуды импульса плотности ионного тока более 20–30%. Представлен механизм стабилизации плотности энергии пучка в серии импульсов, связанный с перезарядкой ионов и формировани-

ем ускоренных нейтралов. Для увеличения эффективности генерации ионного пучка разработана спиральная геометрия диода. В новой конструкции впервые удалось реализовать замкнутое движение электронов в анод-катодном зазоре без внешнего магнитного поля. Это привело к росту эффективности преобразования энергии, подводимой к диоду, в энергию пучка с 5–9 % (в диодах с магнитной самоизоляцией и с незамкнутым дрейфом) до 30–40 %.

## Введение

Радиационно-пучковое модифицирование металлических изделий мощным ион-ным пучком (МИП) обеспечивает высокие скорости нагрева и последующего охлаждения их приповерхностного слоя, превышающие  $10^7$ – $10^8$  К/с. Давление в области поглощения достигает  $10^8$ – $10^{10}$  Па. Это позволяет получать составы и структуры, недоступные ни од-ному из традиционных металлургических способов. Сочетание высокого прессыщения твердого раствора и субструктурного строения создает уникальные эффекты повышения поверхностной прочности, износостойкости и улучшения других свойств материалов [1].

Для эффективной генерации МИП нужно решить две задачи: подавить электрон-ную компоненту полного тока диода и сформировать плотную плазму на поверхности анода. После приложения напряжения к диоду и образования катодной и анодной плазмы генерация электронного и ионного тока происходит одновременно. При плотности тока более  $20$  А/см<sup>2</sup> проявляются коллективные эффекты и ток ограничивается объемным зарядом в анод-катодном (А-К) зазоре. Плотность тока описывается соотношениями Чайл-да-Ленгмюра [2]:

$$\text{Плотность электронного тока} \quad J_e = \frac{4\varepsilon_0 \sqrt{2e}}{9\sqrt{m}} \cdot \frac{U^{3/2}}{d_0^2} = 2.33 \cdot 10^{-6} \frac{U^{3/2}}{d_0^2}$$

$$\text{Плотность ионного тока} \quad J_{\text{ион}} = \frac{4\varepsilon_0 \sqrt{2z}}{9\sqrt{M}} \cdot \frac{U^{3/2}}{d_0^2}$$

где  $U$  – ускоряющее напряжение,  $d_0$  А-К зазор,  $m$ ,  $e$  – масса и заряд электрона,  $M$ ,  $z$  – масса и заряд иона.

Как следует из этих соотношений, максимальная плотность тока протонов в режиме ограничения объемным зарядом составляет 2,3 % от плотности электронного тока. Плотность ионного тока более тяжелых ионов еще ниже.

В 1973 г. Р. Судан и Р. Ловелайс [3] предложили конструкцию ионного диода с внешней магнитной изоляцией. Наличие магнитного поля с индукцией, вызывающей от-клонение (под действием силы Лоренца) траектории электрона на угол более  $90^\circ$  ( $B > B_{\text{кр}}$ ) обеспечивает дрейф электронов поперек электрического поля в А-К зазоре. При времени дрейфа, превышающем время ускорения ионов, затраты энергии на ускорение электронов сокращаются. Но дополнительный источник энергии для формирования магнитного поля

повышает энергопотребление генератора МИП. Например, при полной энергии МИП в импульсе 80–90 Дж требуется 500–1000 Дж от источника магнитного поля [4]. Эффективность генерации ионного пучка при этом менее 10% при эффективности работы ионного диода 80–90%. Поэтому для диодов с внешней магнитной изоляцией полная эффективность генерации МИП, равная 10–15%, является предельной. В 1977 г. С. Хамприес [5] предложил конструкцию ионного диода с магнитной самоизоляцией. Поперечное магнитное поле в А-К зазоре формировалось собственным током диода при протекании по электродам.

Для формирования плотной плазмы на поверхности анода в 1980 г. Е.И. Логачев и др. [6] предложили использовать явление взрывной эмиссии электронов [7]. Они использовали генератор сдвоенных импульсов – первый импульс отрицательной полярности и второй положительной полярности. В течение первого импульса на поверхности потенциального электрода (катода) формируется взрывоэмиссионная плазма. В течение второго импульса ионы эмитируются из плазмы и ускоряются в А-К зазоре. На *рис.1 цветной вкладки* показана блок-схема диодного узла и типичные осциллограммы, характеризующие работу диода [8, 9].

Выполненные исследования показали, что для формирования сплошного плазменного слоя на катоде площадью 100–200 см<sup>2</sup> достаточно 300–400 нс. После изменения полярности напряжения происходит освобождение А-К промежутка от взрывоэмиссионной плазмы (эффект плазменного сжатия) [10]. В результате величина А-К зазора восстанавливается до первоначальной, что повышает однородность МИП по сечению. Ионные диоды, использующие взрывную эмиссию, имеют ресурс непрерывной работы более 10<sup>7</sup> импульсов [8], что важно для технологических применений МИП.

### Эффекты подавления электронного тока и усиления ионного тока

Высокая эффективность генерации мощных ионных пучков обеспечивается в основном за счет подавления электронной компоненты полного тока

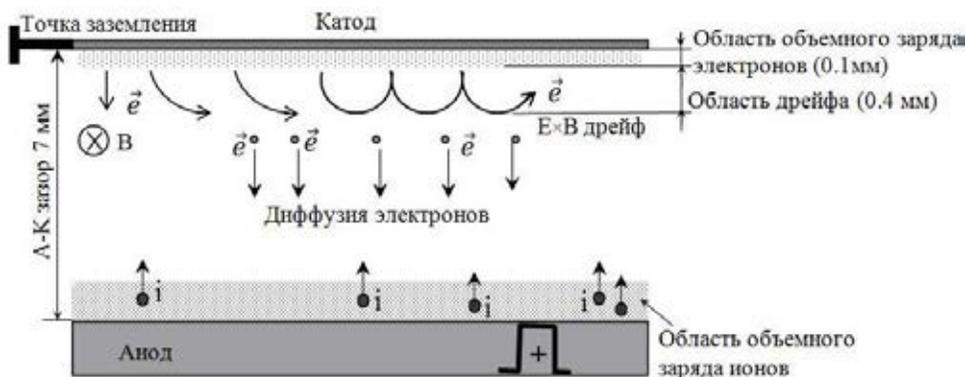


Рис. 1. Схема движения электронов и ионов в диоде с магнитной самоизоляцией

диода при увеличении времени пребывания электронов в А-К зазоре. При генерации МИП электроны эмитируют с поверхности катода и далее дрейфуют вдоль его поверхности (*рис. 1*)

В диоде с внешней магнитной изоляцией легко реализовать замкнутый дрейф электронов (*barrel diode* [11]), что обеспечивает их дрейф (в поперечном направлении по отношению к силовым линиям электрического поля) в течение всего импульса ускоряющего напряжения и как следствие – высокую эффективность генерации МИП. В диоде с магнитной самоизоляцией замкнутый дрейф электронов организовать сложно, так как один конец катода соединен с корпусом диодной камеры.

Оценочные расчеты показывают [12], что в большинстве известных конструкций диодов с магнитной самоизоляцией время ускорения ионов превышает время дрейфа электронов и разработанные конструкции диодов не обеспечивают реализацию эффекта подавления электронного тока собственным магнитным полем. Результаты анализа режима работы ионных диодов с магнитной самоизоляцией разной конструкции обобщены в *таблице*.

Выполненный анализ показал, что регистрируемое снижение электронного тока в диодах с магнитной самоизоляцией ( $K_1 \geq 2$  в таблице) вызвано не увеличением времени пребывания электронов в А-К зазоре, а образованием виртуального катода [13]. Расчеты показывают, что в течение генерации МИП электроны дрейфуют вдоль поверхности катода в тонком слое толщиной менее 1 мм при А-К зазоре 6–10 мм. Они дрейфуют в области объемного заряда электронов, эмитированных с поверхности катода (*рис. 1*).

Плотность электронов в области дрейфа в 50–100 раз превышает плотность электронов в области объемного заряда. Это приводит к образованию виртуального катода, подавлению ускорения электронов из плазмы под виртуальным катодом и как следствие – к уменьшению электронного тока. Этот процесс обеспечивает снижение электронного тока за счет ограничения эмиссии электронов из плазмы, а не за счет увеличения времени их дрейфа в А-К зазоре.

Выполненный анализ работы ионных диодов с магнитной самоизоляцией показал, что во всех конструкциях плотность тока ионов превышает расчетные по соотношению 2 значения ( $K_2 > 2$ , см. таблицу). Для объяснения полученных результатов предложен новый эффект усиления плотности ионного тока [14], основанный на модели С. Хамприеса локального усиления плотности ионного тока в конце диода с незамкнутым дрейфом электронов [15].

В ионном диоде с магнитной самоизоляцией концентрация электронов в области дрейфа значительно выше, чем в области объемного заряда. Это приводит к росту диффузионных потерь электронов из области дрейфа в А-К зазор ионного диода (*рис. 1*).

Диффузный поток электронов обеспечивают частичную компенсацию положительного объемного заряда ионов и увеличение плотности ионного тока.

**Таблица.**

Режим работы ионных диодов с магнитной самоизоляцией разной конструкции.

Ускоритель	ионы	$B_{кр}$ , Тл	$B_{min}$ , Тл	$B_{Ак}$ , Тл	I <sub>i</sub> /I <sub>e</sub>	ЧЛ	$K_1$	$K_2$	
Mite	протоны	0,27–1,6	4	4–7,5	10%	2,3%	-	4,3	[16]
POLLUX		-	-	1,5 $B_{кр}$	18–28%	2,3%	1,4	4-6	[17]
ПАРУС		0,25–0,38	1,8	0,31–0,73	15–20%	2,3%	2–2,5	3-4	[18]
ТОНУС, ВЕРА		0,19	0,23	0,18	27–33%	4,6%	1,9–2,3	2-5	[19]
ETIGO-1		0,25	1,75	0,73	29%	2,3%	1,26	10	[20]
ТЕМП-4М Плоский полосковый диод	C+ (85%) и протоны	0,17–0,22	1,8–2,2	0,7	5–6%	0,7%	1,5–2	5-8	[10]
ТЕМП-4М Фокусирующий диод		0,17–0,22	1,8–2,2	0,7	8–9%	0,7%	1,5–2	5-8	[12]
ТЕМП-4М Кольцевой диод		0,16–0,21	0,76–0,93	0,4–0,6	15–20%	0,7%	4–5	-	[21]
ТЕМП-4М Спиральный диод		0,26	0,34	0,8	17–20%	0,7%	2–2,5	-	[22]
ТЕМП-4М Диод с замкнутым дрейфом		0,24	0,34	3,1	30– 40%	0,7%	2,3–2,6	-	[23]

 $B_{кр}$  – критическая магнитная индукция $B_{min}$  – магнитная индукция в А-К зазоре, при которой время дрейфа электронов равно времени ускорения ионов $B_{Ак}$  – магнитная индукция в области дрейфа электронов в А-К зазоре

ЧЛ – отношение расчетной плотности ионного тока (соотн. 2) к расчетной плотности электронного тока (соотн. 1)

 $K_1$  – отношение расчетной плотности электронного тока по соотношению 1 к экспериментальной плотности электронного тока $K_2$  – отношение экспериментальной плотности ионного тока к расчетной по соотношению 2**Замкнутый дрейф электронов в ионном диоде с магнитной самоизоляцией**

В ионном диоде с магнитной самоизоляцией для эффективного подавления электронного тока необходимо уменьшать скорость дрейфа электронов и (или) увеличивать длину диода. В течение генерации ионного пучка элек-

троны эмитируют с поверхности катода и далее дрейфуют вдоль А-К зазора (*рис. 1*). Поэтому достаточно увеличить длину катода, что легко реализовать в спиральной конструкции. В спиральном ленточном диоде с магнитной самоизоляцией [22] впервые удалось реализовать снижение электронной компоненты полного тока собственным магнитным полем – время дрейфа электронов значительно превысило время нахождения ионов в А-К зазоре. Это привело к росту эффективности преобразования энергии, подводимой к диоду, в энергию ускоренных ионов углерода с 5–9% (в диодах по-лосковой конструкции) до 17–22% в спиральном диоде (*рис. 2 цветной вкладки*).

Полную энергию ионного пучка рассчитывали интегрированием распределения плот-ности энергии МИП по сечению. Диагностику проводили по тепловизионной методике [24]. Энергию, поступающую от генератора наносекундных импульсов в диод, рассчитывали по ВАХ диода (интеграл произведения ускоряющего напряжения на полный ток в течение второго импульса, см. *рис. 1 цветной вкладки*).

С целью дальнейшего повышения эффективности генерации МИП была разработана новая (проволочная) конструкция заземленного электрода. На *рис. 3 цветной вкладки* показан внешний вид диода и термограмма ионного пучка.

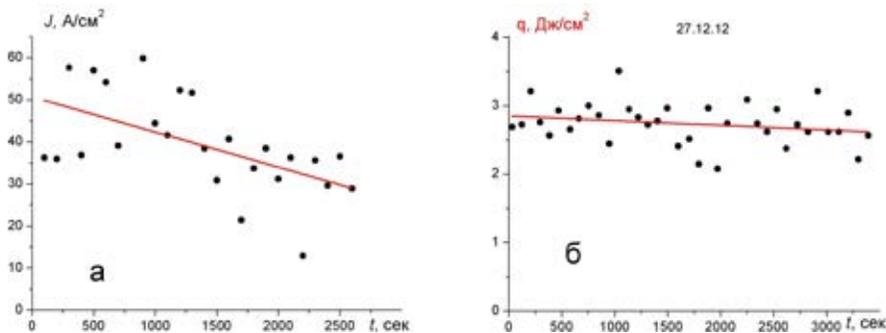
Графитовый потенциальный электрод изготовлен в виде плоского диска диаметром 20 см и высотой 4 см. Заземленный электрод выполнен из проволоки в виде спирали Архимеда с внешним диаметром 14 см, внутренним диаметром 5 см, длина спирали 150–170 см. Для улучшения транспортировки МИП использовали экран [25]. В проволочной конструкции ионного диода с магнитной самоизоляцией впервые удалось реализовать замкнутое движение электронов в А-К зазоре без внешнего магнитного поля [23]. Это привело к росту эффективности преобразования энергии, подводимой к диоду, в энергию ускоренных ионов углерода до 30-40%.

Высокая эффективность генерации МИП в проволочном диоде реализована при значительном превышении магнитной индукции в А-К зазоре над величиной критической магнитной индукции ( $B/B_{кр} \geq 5$ ). Магнитное поле самоизоляции формируется электронным током потерь, поэтому при организации замкнутого дрейфа электронов и оптимизации режима работы в спиральном диоде возможно дальнейшее увеличение эффективности его работы. Спиральная конструкция заземленного электрода обеспечивает более высокую оптическую прозрачность для ионов и позволяет увеличить до 80-90% долю МИП, выведенную из А-К зазора в область транспортировки. Аналогично диодам со взрывоэмиссионным катодом, спиральный диод имеет ресурс работы более 107 импульсов.

## Статистический анализ генерации МИП

Наиболее важными параметрами генератора пучка заряженных частиц, определяющими возможность его технологического применения, являются ресурс непрерывной работы и стабильность параметров в серии импульсов. Концентрация ионов в импульсных ионных пучках гигаваттной мощности не превышает  $10^{12}$  см<sup>-3</sup>, и основным фактором, определяющим изменение

свойств изделия, является тепловое воздействие, а не имплантация ионов. Поэтому для контроля и оптимизации режима обработки изделий таким пучком важна прежде всего стабильность плотности энергии пучка в серии импульсов. Результаты систематических исследований стабильности генерации МИП в диоде с внешней магнитной изоляцией (300–350 кэВ, 80 нс, плотность тока 100–300 А/см<sup>2</sup>) приведены в работе Х.Р. Zhu et al. [26]. Этот диод обеспечивал наиболее стабильную генерацию МИП - стандартное отклонение плотности ионного тока составляло 15–20 % в серии 200 импульсов. Подробный анализ стабильности генерации МИП в разных диодах приведен в работе [27].



**Рис. 2.** Изменение амплитуды импульса плотности ионного тока (а) и плотности энергии в фокусе (б) в серии импульсов

Выполненные нами исследования [26] показали, что стандартная девиация плотности ионного тока в диоде с магнитной самоизоляцией при работе в двухимпульсном режиме превышает 25–30% в серии 100 импульсов при нестабильности параметров ускорителя не более 10%. Но при этом стабильность плотности энергии в серии импульсов значительно выше. Результаты статистического анализа выходных параметров МИП приведены на **рис. 2**.

Статистический анализ генерации МИП в диоде с магнитной самоизоляцией показал [26], что корреляция амплитуды импульса плотности тока МИП с выходными параметрами ускорителя низкая, коэффициент детерминации  $R$  не превышает 0,35. Но выполненные исследования показали высокую корреляцию полной энергии и плотности энергии пучка с параметрами ускорителя ТЕМП-4М,  $R > 0,9$ . На **рис.4 цветной вкладки** показаны сводные экспериментальные данные для разных диодов при измерении полной энергии пучка калориметром полного по-глощения и с помощью тепловизионной диагностики.

Для всех исследованных диодов, кроме спирального, зависимость полной энергии пучка от полного заряда описывается соотношением  $E = -35 + 22Qd$  при стандартной девиации экспериментальных данных от расчетных не более 7%. Для этих диодов характерен незамкнутый дрейф электронов. Зависимость полной энергии пучка от полного заряда в спиральном диоде

значительно отличается от данных для других диодов. Это подтверждает реализацию нового механизма генерации МИП в диоде с магнитной самоизолирующей – замкнутом дрейфе электронов.

### Формирование ускоренных нейтралов

Характерной особенностью процесса генерации импульсных ионных пучков в диодах с пассивным анодом является перезарядка ускоренных ионов в процессе упругого взаимодействия с молекулами остаточного газа в А-К зазоре [28]. В работе [11] приведены результаты исследования параметров МИП, формируемого диодом с внешней магнитной изоляцией (400 кВ, 30 кА, 0,5 мкс). Плотность энергии ионного пучка на мишени измеряли с помощью тепловизора и путем интегрирования произведения плотности ионного тока на ускоряющее напряжение. При плотности энергии до 5 Дж/см<sup>2</sup> значения двух независимых методов совпадали, что указывает на незначительный вклад ускоренных нейтралов в полную энергию формируемого пучка. Аналогичные исследования были выполнены на ускорителе ТЕМП-4М. Получено, что для диода с внешней магнитной изоляцией [4] плотность энергии МИП, рассчитанная по плотности ионного тока, совпадает (в пределах точности измерения) с данными, полученными по тепловизионной методике. Но для диода с магнитной самоизолирующей плотность энергии, измеренная по тепловизионной методике, превышает значения, рассчитанные по осциллограммам ускоряющего напряжения и плотности ионного тока, в 3–4 раза [29].

Выполненный статистический анализ генерации пучка ионным диодом в двухимпульсном режиме в серии импульсов показал, что при очень высокой нестабильности плотности ионного тока ( $sd = 25\text{--}30\%$ ) пучок имеет высокую стабильность полной энергии и плотности энергии в фокусе ( $sd = 10\text{--}12\%$ ). Если пучок состоит только из ускоренных ионов, то стандартная девиация плотности энергии МИП в серии импульсов определяется нестабильностью от импульса к импульсу флюенса ионов (или плотности ионного тока) и кинетической энергии ионов (или ускоряющего напряжения). Тогда для измеренных значений стандартной девиации плотности ионного тока (29 %) и ускоряющего напряжения (5%), стандартная девиация плотности энергии МИП должна составлять 30%, что значительно выше экспериментальных данных (9–11%). Кроме того, при работе ионного диода в двухимпульсном режиме плотность ионного тока слабо зависит от величины ускоряющего напряжения и других выходных параметров ускорителя ТЕМП-4М. В тоже время полная энергия пучка и плотность энергии однозначно определяется параметрами ускорителя.

Полученные результаты измерения плотности энергии МИП и статистического анализа работы ионного диода с магнитной самоизолирующей в двухимпульсном режиме можно объяснить более эффективной (по сравнению с диодом с внешней магнитной изоляцией) перезарядкой ускоренных ионов в процессе упругого взаимодействия с молекулами остаточного газа в анод-катодном зазоре. Наличие длительной паузы между моментом десорбции молекул с поверхности анода и моментом генерации ионов в двухимпульсном режиме (400–600 нс, см. *рис.1 цветной вкладки*) увеличивает толщину

слоя десорбированных молекул. Это значительно увеличивает число актов перезарядки одного иона в процессе его ускорения в А-К зазоре. Если количество атомов, которые могут принять участие в перезарядке ускоренных ионов, ограничено, то процесс перезарядки будет стабилизировать полную энергию МИП в серии импульсов. При увеличении общего количества ионов число актов перезарядки на один ион уменьшается и наоборот. Если суммарная энергия ускоренных нейтралов превышает суммарную кинетическую энергию ионов, то стабильность полной энергии комбинированного пучка (МИП+нейтралы) в серии импульсов будет выше, чем стабильность ионного тока.

## Заключение

Проведенные комплексные исследования процесса генерации импульсных ионных пучков гигаваттной мощности, формируемых диодом со взрывоэмиссионным катодом, позволили выявить основные закономерности их работы в режиме магнитной самоизоляции. На основе полученных данных разработаны новые конструкции ионных диодов, которые обеспечивают более высокую эффективность преобразования подведенной энергии в энергию ускоренных ионов. Выполненные исследования показали, что ионный диод с магнитной самоизоляцией, работающий в двухимпульсном режиме, может обеспечить формирование интенсивного потока нейтральных атомов. Энергия ускоренных нейтралов составляет 10–50 кэВ [27]. Плотность энергии такого пучка может составлять 2–5 Дж/см<sup>2</sup>, что обеспечивает флюенс ускоренных нейтралов (2–4) 10<sup>15</sup> частиц/см<sup>2</sup> за один импульс.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 06-08-00147-а, 08-08-12086-офи, 12-08-00118-а и 12-08-07014-д

## Литература

1. Быстрицкий В.М., Диденко А.Н. Мощные ионные пучки. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
2. Langmuir I. Phys. Rev. – Vol. 2. – P. 45.
3. Sudan R.N., Lovelace R.V. Phys. Rev. Lett. – 1973. – Vol. 31. – № 19. – P. 1174.
4. Фурман Э.Г., Степанов А.В., Фурман Н.Ж. ЖТФ. – 2007. – Т. 77. – № 5. – С. 86.
5. Humphries S. Plasma Phys. – 1977. – Vol. 19. – P. 399.
6. Логачев Е.И., Ремнев Г.Е., Усов Ю.П. Письма в ЖТФ. – 1980. – Т. 6. – №. 22. – С. 1404.
7. Месяц Г.А., Проскуровский Д.И. Импульсный электрический разряд в вакууме. – Новосибирск: Наука, 1984. – 256 с.
8. Pushkarev A., Isakova Yu. Surf. Coat. Technol. (2012), doi:10.1016/j.surfcoat.2012.05.094
9. Isakova Yu. J. Korean Physical Society. – 2011. – Vol. 59. – No. 6. – PP. 3531.
10. Pushkarev A., Isakova J., Saltimakov M., Sazonov R. Physics of Plasmas 17, 013104 (2010).
11. Davis H.A., Bartsch R.R., Olson J.C., Rej D.J., Waganaar W.J.J. Appl. Phys. – 1997. – Vol. 2 – № 7. – P. 3223.

12. *Пушкарев А.И., Исакова Ю.И.* Ионный диод с магнитной самоизоляции. Аналитический обзор и экспериментальные исследования. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic 13. Pub-lishing GmbH & Co. – KG, 2012. – 152 с.
13. *Pushkarev A., Isakova Yu., Guselnikov V.* Phys. Plasmas 18, 083109 (2011).
14. *Pushkarev A., Isakova Yu., Vahrushev D.* Physics of Plasmas 17, 123112 (2010).
15. *Humphries S.* Charged Particle Beams. Wiley, New York, 1990. – 847 p.
16. *Vandevender J.P., Quintenz J.P., Leeper R.J., Johnson D.J., Crow J.T.J.* Appl. Phys. – 1981. – №52/1. – P. 4.
17. *Zieher K.W.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 1984. – V. 228. – PP. 161.
18. *Bystritskii V.M., Glushko Yu.A., Kharlov A.V., Sinebryukhov A.A.* Laser and Particle Beams. – 1991. – Vol. 9. – № 3. – P. 691.
19. *Быстрицкий В.М., Диденко А.Н., Красик Я.Е., Матвиенко В.М.* Физика плазмы. – 1985. – Т. 11. – № 9. – С. 1057
20. *Yoshikawa T., Masugata K., Ito M. Matsui. M., Yatsui K.J.* Appl. Phys. – 1984. – Vol. 56. – № 11. – P. 3137.
21. *Пушкарев А.И., Исакова Ю.И.* ЖТФ. – 2012. – Т. 82. – № 2. – С. 24.
22. *Pushkarev A., Isakova Yu.* Laser and Particle Beams. – 2012. – Vol. 30, issue 3, P. 427.
23. *Pushkarev A.I., Isakova Y.I.* Phys. Plasmas 20, 053101 (2013).

# Беспроводная передача электрической энергии на Земле и в космосе

В.В. Капранов, В.Ю. Тугаенко

*Памяти академика  
Б.Е. Чертока*

*Капранов Виталий Владимирович,  
аспирант, инженер ОАО «Ракетно-  
космическая корпорация «Энергия»  
имени С.П. Королева»,*

*Тугаенко Вячеслав Юрьевич,  
кандидат физ-мат наук, начальник  
отдела ОАО «Ракетно-космическая  
корпорация «Энергия» имени С.П.  
Королева»*

*Проект РФФИ № 13-08-11504*

## Введение

В наиболее общем смысле беспроводная передача энергии (БПЭ) - это передача энергии от источника к потребителям без затрат дополнительных ресурсов вещества или энергии для создания канала передачи. Электрическая энергия может претерпевать преобразование в практически любую форму на передатчике и преобразовываться обратно на приёмнике сколь угодно сложными способами, принципиальным является только отсутствие между передатчиком и приёмником преобразователем искусственно организованных сред для переноса энергии.

Как правило БПЭ связана с преобразованием одного вида энергии в другие виды энергии, которое сопровождается потерями, превышающими потери в кабельных сетях, и с этой позиции ее применение ограничено областями, где использование кабельных, либо трубопроводных сетей невозможно, либо сопряжено с большими материальными затратами.

На Земле БПЭ может использоваться для:

- передачи энергии в труднодоступные районы, где прокладка линий электропередач, газо- и нефтепроводов нерентабельна;
- энергоснабжения арктических, островных и океанических исследовательских станций;
- длительного энергообеспечения подвижных объектов (например, летательных аппаратов), питание которых от автономных энергоустановок либо невозможно (в том числе по весовым ограничениям), либо экономически нецелесообразно.

Широкое применение технология БПЭ может найти в космической деятельности. Наибольшее внимание системы БПЭ привлекли в связи с появлением в 60 - 70 гг. проектов энергоснабжения Земли из космоса - космических солнечных электростанций (КСЭ) мощностью от нескольких МВт до ТВт. Как правило, дистанционное энергоснабжение наземных потребителей предлагается осуществлять посредством КСЭ на базе солнечных батарей, передающих электрическую энергию с помощью СВЧ, либо лазерного канала. Передача энергии возможна и от космической электростанции (ядерной или солнечной) на объекты космической инфраструктуры, такие как межорбитальные буксиры, технологические модули с малым уровнем микрогравитации, микроспутники, напланетные станции, роверы и др.

## **Разнообразие технологий**

### **• *Ультразвуковой метод***

Излучаемый ультразвук преобразуется приёмником в электричество. В реальных прототипах передавалась мощность в несколько Вт при максимальном напряжении 8 В.

### **• *Метод электромагнитной индукции***

БПЭ методом электромагнитной индукции использует ближнюю зону генератора электромагнитного поля. Переменный электрический ток, протекающий через первичную обмотку, создаёт переменное магнитное поле, которое индуцирует электрический ток во вторичной обмотке. Эффективность этой технологии очень тесно связана с расстояниями между обмотками, даже на небольших расстояниях между обмотками потери значительны. Однако использование резонанса может несколько увеличить дальность передачи. При резонансной индукции передатчик и приёмник должны быть настроены на одну частоту. Простейшим примером устройства использующего такую технику является трансформатор. Обмотки трансформатора прямо не связаны, а передача энергии осуществляется посредством взаимной индукции.

### **• *Электростатическая индукция***

Электростатическая индукция или ёмкостная связь представляет собой передачу электрической энергии полем в диэлектрике. По сути этот процесс схож с разрядом конденсатора.

### **• *Микроволновое излучение***

Узконаправленная микроволновая передача энергии может происходить на большие расстояния. Для обратного преобразования используются ректенны, эффективность преобразования энергии которых превышает 95 %. Данный способ активно обсуждается в космических приложениях.

- **Лазерный метод**

В области спектра от 10 мкм до 10 нм энергию можно передать путём ее преобразования в луч лазера, который затем может быть направлен на фотоэлементы приёмника.

Монохроматический свет может обладать крайне малым углом расходимости, что позволяет эффективно передавать энергию на огромные расстояния. Лазерное излучение не создаёт радиочастотных помех. До недавнего времени преобразование электрической энергии в электромагнитное излучение было неэффективным, однако уже появились лазерные диоды с КПД преобразования в 80%. Аналогичная ситуация наблюдается и с преобразователями света в электричество. Как и при микроволновой передаче, этот метод требует прямой видимости между передатчиком и приёмником [1].

- **Электропроводность**

Система SWER (Single Wire with Earth Return) основывается на проводимости земли и одном изолированном проводе. Иногда в аварийных случаях высоковольтные линии могут работать в режиме SWER. Замена провода на атмосферный канал проводимости тока позволяет говорить о методе беспроводной передачи электроэнергии. Кроме того проводились исследования возможности передачи электроэнергии только через землю.

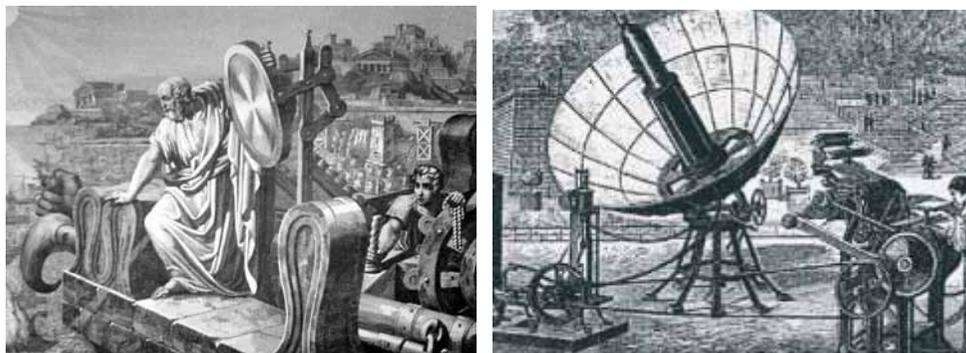
Несмотря на потенциальное многообразие способов БПЭ, реальное практическое применение в обозримом будущем найдёт, по всей видимости, только электромагнитный канал, причём рассматриваются в основном два метода — микроволновый и лазерный.

- **Беспроводная энергия — первые шаги**

Ещё в древности люди начали задумываться о возможностях передачи энергии на расстояния через атмосферу. Как правило имелась ввиду солнечная энергия. С помощью специальных зеркал поджигались факелы в храмах — так начиналась беспроводная энергия. Постепенно совершенствовались способы передачи и применения этой энергии.

## **История БПЭ**

Документы свидетельствуют о первом факте БПЭ в 7 веке до н.э. Хотя способ был очень примитивный, но это был первый шаг. Речь идёт о сожжении муравьев с использованием неровных стёкол. Древние жители Африки, Азии получали поваренную соль выпаривая морскую воду с помощью специальных приспособлений. В 3 веке до н.э. отмечаются регулярные поджигания факелов в храмах с использованием концентрированного солнечного света, а также к этому времени относится постройка системы отопления султанского дворца в Турции, которая использовала воду, нагретую солнечным излучением. Согласно легенде, великий греческий учёный Архимед сжёг неприятельский флот, осадивший его родной город Сиракузы, с помощью системы зажигательных зеркал. С 1 по 4 века н.э. в документах присутствуют упоминания Римских бань, где солнечная энергия использовалась для подогрева воды [2]. (рис. 1)



**Рис. 1.** История БПЭ ( а) — Архимед управляет своим зажигательным зеркалом; б) — Паровой котел на солнечной энергии, приводящий в движение печатный станок]

Настоящий «солнечный бум» начался в XVIII столетии. Первые солнечные нагреватели появились во Франции. Естествоиспытатель Ж. Бюффон создал большое вогнутое зеркало, которое фокусировало в одной точке отражённые солнечные лучи. Это зеркало было способно в ясный день быстро воспламенить сухое дерево на расстоянии 68 метров. Вскоре после этого шведский учёный Н. Соссюр построил первый водонагреватель. Это был всего лишь деревянный ящик со стеклянной крышкой, однако вода, налитая в немудрёное приспособление, нагревалась солнцем до 88°C. В 1774 году французский учёный А. Лавуазье впервые применил линзы для концентрации энергии солнца. Вскоре в Англии отшлифовали большое двояковыпуклое стекло, расплавившее чугун за три секунды. Первые солнечные батареи, способные преобразовывать солнечную энергию в механическую, были построены во Франции. В конце XIX века на Всемирной выставке в Париже изобретатель О. Мушо демонстрировал аппарат, который при помощи зеркала фокусировал лучи на паровом котле. Котёл приводил в действие печатную машину [3].

### **Беспроводная передача электроэнергии**

Беспроводная передача электричества — способ передачи электроэнергии без использования проводников в электрической цепи. Началом развития беспроводной передачи электроэнергии принято считать открытие закона Ампера в 1820 году, который показал, что электрический ток создает магнитное поле. В следующие 50 лет сложилась теория электромагнитного поля — Максвелл обобщил все предыдущие факты и теории в строгое математическое описание. В 1888 Герц подтверждает существование электромагнитного поля, создавая «Аппарат для генерации электромагнитного поля». К этому моменту идеи передачи электричества без проводов интересовали многих.

Никола Тесла улучшил передатчик волн Герца, и уже в 1893 году продемонстрировал беспроводное освещение лампами в Чикаго. Одна из его простых экспериментальных установок состояла из пары небольших медных катушек — одной передающей с источником тока и одной принимающей с

лампой, удаленной на 2 м. Опыты показывали, что лампа светилась, даже если катушки разделяли металлическим или деревянным брусом.

Позже Тесла писал: «Передача энергии без проводов — не теория и не просто вероятность, как это представляется большинству людей, но явление, которое я экспериментально демонстрировал в течение ряда лет» [4].

Идея беспроводной передачи электроэнергии методами Тесла не остаётся безнадежной. В конце первого десятилетия XXI века MIT и Intel в своих лабораториях провели ряд экспериментов, в результате которых получилось передать электрический ток с мощностью в 60 Вт на небольшое расстояние (около 2 метров), но и это уже можно считать успехом. Немного позже, нечто подобное получилось повторить другой компании под названием Nevada Lightning Lab, но с лучшими результатами. После проведения компанией ряда экспериментов, удалось передать электроэнергию мощностью 800 Вт, на расстояние 5 метров, а в некоторых случаях, получалось увеличить расстояние до 15 метров. Также, было замечено, что при увеличении транспортируемых мощностей, потери при передаче значительно снижаются. Хотя это и является относительно малыми расстояниями и коэффициенты полезного действия всего 9-14%, сам факт очень важен. Все изобретения и устройства начинали с малых показателей. *(рис.1 цветной вкладки).*

Для примера использования беспроводной передачи электроэнергии в повседневном быту можно привести разработку компании WiTriCiti (Wireless Electricity). Они обещают в ближайшем будущем выпустить устройства, основанные на принципе резонансной электромагнитной индукции. Это будут передатчики и приёмники сетевой электроэнергии. Вы включаете в домашнюю розетку небольшой передающий блок питания, а в приёмный блок — ноутбук, светильник, фен или электробритву. Тем самым вы освобождаетесь от проводных соединений. В лабораторных исследованиях получалось производить передачу энергии на расстояния в несколько метров с довольно высоким КПД в 70%.

В последние 50 лет проблема БПЭ и ее применение в военной и технологической сфере находятся в области интересов большинства стран, развитых в технологическом отношении.

В 1964 г. профессор Brown (США), продемонстрировал полет вертолёта, использующего 2,45 GHz микроволны, как показано на рисунке 3. Для сопряжения электродвигателя с принимаемым потоком микроволнового излучения использовалась ректенна, которая представляет собой плоскую матрицу выпрямляющих диодов, каждый из которых соединён с индивидуальной приёмной антенной, расположенных на расстоянии, определяемом длиной волны (обычно для диапазоне частот от 1 до 10 ГГц) и преобразующей микроволновое излучение в постоянный электрический ток [5,6].

Ректенны также использовались в демонстрациях БПЭ для полётов беспилотного воздушного транспортного средства (UAV) созданного в 1987, в рамках программы SHARP. *(рис.2 цветной вкладки).*

Концепция летательного аппарата с микроволновым электропитанием предложенная профессором Leik N. Mugaabo (США, 1995 г.) показана на рисунке 4. Летательный аппарат представляет собой аэроплан, наполненный

гелием, диаметром 15 м и массой 1400 кг. Микроволновый луч направляется на аппарат сверху с КСЭ. Расчёты, положенные в основу проекта, предполагают работу в потоке микроволнового излучения мощностью 5,6 ГВт. Предполагается, что всё электрооборудование выполнено на основе SiC полупроводниковых приборов в высокотемпературном исполнении и охлаждается гелием. (*рис.3 цветной вкладки*).

Американская фирма LaserMotive победила в 2009г. в соревновании NASA по реализации технологии БПЭ, продемонстрировав систему передачи 500 Вт на расстояния до 1 км с эффективностью 10%. В следующих разработках участвовал беспилотный летательный аппарат Stalker компании Lockheed Martin. Этот малый летательный аппарат в ходе демонстрации в 2012 г. продержался в воздухе двое суток, используя энергию, получаемую лазерной системой LaserMotive. Энергия передавалась с помощью лазерного луча с наземной установки на транспортном средстве, и принималась модулем фотоприемников, установленных на беспилотном аппарате. Когда летательный аппарат входил в зону действия наземной установки, то начинался процесс передачи энергии для зарядки аккумуляторов. За время нахождения в «зоне подзарядки» аккумуляторы заряжались энергией достаточной для полета в автономном режиме, длительностью от полутора до двух часов времени. (*рис.4 цветной вкладки*).

## Военные приложения

Отдельным пунктом в любых исследованиях стоят военные задачи. И БПЭ не исключение, ещё со времён Тесла эта область разрабатывалась и для военных целей. Многие фантасты используют лазерное оружие в своих произведениях. В 60 — 70 -х годах 20 века в СССР и США активно развивалась тематика мощных лазеров, что вылилось в отдельную отрасль лазерной физики.

Состояние разработки боевого лазерного оружия, способного эффективно поражать различные цели, в настоящее время неоднозначно и, тем более, неопределённо в области его практического применения. Первые успешные наземные испытания МВт химического лазера, который устанавливается на борту самолёта Boeing 747, уже прошли в 2007 г. Однако программа была закрыта из-за чрезмерной сложности и стоимости оборудования. (*рис.5 цветной вкладки*).

Последние успехи в области волоконных лазеров сделали именно их главным кандидатом на источник излучения для военного лазера. Целый ряд стран разрабатывает системы основанные на волоконных лазерах для уничтожения беспилотных аппаратов, ракет, кораблей. В 2012 году компания Raytheon продемонстрировала успешную работу своей системы на авиасалоне Фарнборо. Сбит был беспилотный летательный аппарат непрерывным волоконным лазером мощностью 50кВт.

Перспективы создания боевого лазерного оружия эксперты в этой области, несмотря на противоречивые и недоказанные данные в связи с закрытостью этой темы, оценивают, как реалистичные. Это обусловлено, в первую очередь, бурным развитием современных технологий, расширением области использования лазерных средств. По некоторым оценкам реальное появление боевого лазерного оружия возможно в период 2015-2020 годы.

## Космос и беспроводная передача энергии

Основываясь на теоретических и практических результатах исследований вопросов БПЭ, проведённых P. Glaser, в 1968 г. Arthur D. Little предложил концепцию размещения солнечной электростанции большой мощности на геостационарной орбите для производства электроэнергии и передачи её на Землю в виде потока электромагнитной энергии. Министерство энергетики США (DOE) и NASA исследовало концепцию геостационарной солнечной электростанции в конце 1970 г [7]. Предполагалось строительство крупномасштабной энергопроизводящей системы с 60-ю космическими солнечными электростанциями, для производства и поставки 300 ГВт электроэнергии в единую энергосистему США. NASA/DOE исследовало модель, в которой отдельная космическая солнечная электростанция строилась на основе солнечной батареи с размерами 5 x 10 км, и диаметром передающей антенны 1 км. Приёмная ректенна размещалась на поверхности Земли, на площадке с размерами 10x13 км. В начале 80-х годов, был выпущен отчёт, содержащий результаты проведённых исследований, а также заключение, что предложенная концепция КСЭ может быть реализована и доведена до экономически выгодного применения [8].

Лазерная передача энергии — другой рассматриваемый способ передачи энергии с космической электростанции на Землю. Архитектура системы с лазерной передачей энергии была исследована в рамках программы SERT, предложенной JAXA в 2004 г. Концепция базируется на применении лазеров с солнечной накачкой, исследуемых в Институте Лазерных Технологий в Университете Осаки [9,10]. *(рис. 6 цветной вкладки).*

Развитие солнечной и ядерной космической энергетики должно привести к различным приложениям технологии БПЭ в космосе. Энергия подводимая извне к двигательным установкам космических аппаратов позволит создать транспортные системы межорбитальных перевозок грузов гораздо более экономичные, чем используемые в настоящее время. Это крайне важный вопрос для всей космонавтики, так как сегодня доставка 1 кг груза на ГСО обходится в 30-40 тыс. долларов США, а использование межорбитальных буксиров с системами БПЭ позволит сократить эти расходы как минимум в несколько раз.

Другим примером использования БПЭ может служить КА для проведения экспериментов в условиях микрогравитации, необходимый уровень которой должен быть столь низким, что становится невозможным размещение на борту энергоустановок с движущимися частями (например, ориентируемых СБ), а требования по потребляемой мощности и ресурсу не позволяют использовать электрохимические генераторы и химические источники тока. Одним из возможных путей решения проблемы является беспроводная передача энергии от находящейся поблизости (но механически не связанной с КА) энергетической станции.

В России РКК «Энергия» занимается проектом по беспроводной передаче энергии инфракрасным излучением между космическими аппаратами. Планируется проведение космических экспериментов между российским сегментом МКС и кораблем «Прогресс». В настоящее время проводятся де-

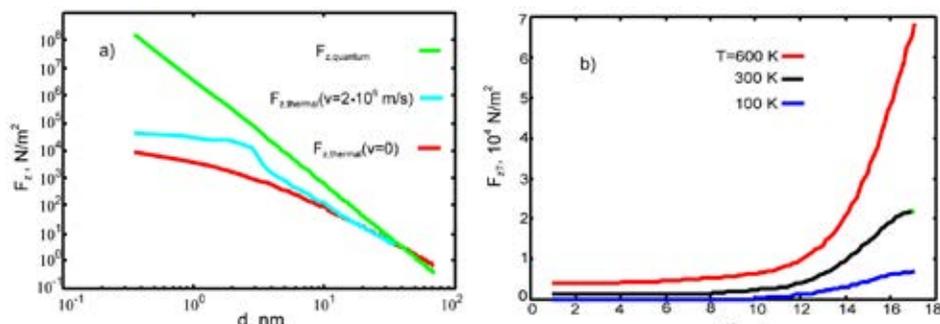
монстрационные наземные эксперименты с макетами и экспериментальными образцами. Целью проекта является создание систем БПЭ для дистанционного энергоснабжения космических аппаратов [11].

## Литература

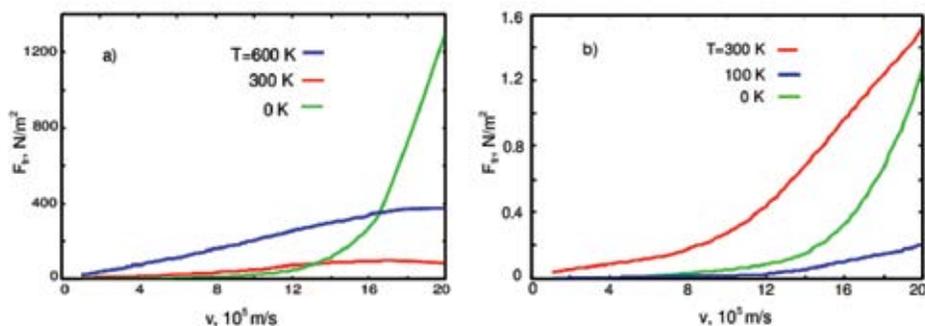
1. *Leopold Summerer, Oisin Purcell* . Concepts for wireless energy transmission via laser , IEEE ICSOS, 2009.
2. *Плутарх*. Сравнительные жизнеописания. В 2 т. Наука. 1994. Т.1. 704 стр. Т.2. 672 с.
3. U.S. Department of Energy. «The history of solar», 2001.
4. *Nicola Tesla*. The transmission of electrical energy without wires. Electrical World and Engineer, March 1905.
5. *Pignolet G.* «Antenna designs for wireless power transportation», TheGrand Bassin case study in Reunion island. Proc ISAP'96, Chiba. p. 397-400.
6. *William C. Brown*. The history of power transmission by radio waves. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions, 32(9):1230- 1242, September 1984.
7. *Peter Glaser*. Power from the sun: Its future. Science, 162:856-861, 1968.
8. *Ванке В.А., Лопухин В.М., Савин В.И.* Проблемы солнечных космических электростанций// Успехи Физических Наук. 1977. Т.123, № 4. 633-655.
9. Study on Space Solar Power Systems. JAXA contractor report , 2003.
10. *Нагатомо М., Сасаки С., Наруо Й., Ванке В.А.* Работы института космический исследований Японии в области космической энергетики. Успехи Физических Наук. 1994. Т.164, № 6.
11. *Черток Б.Е., Тугаенко В.Ю.* Новые космические технологии – беспроводная передача энергии между космическими аппаратами. Новости космонавтики. 2009, № 9.

К статье А.И.Волокитина

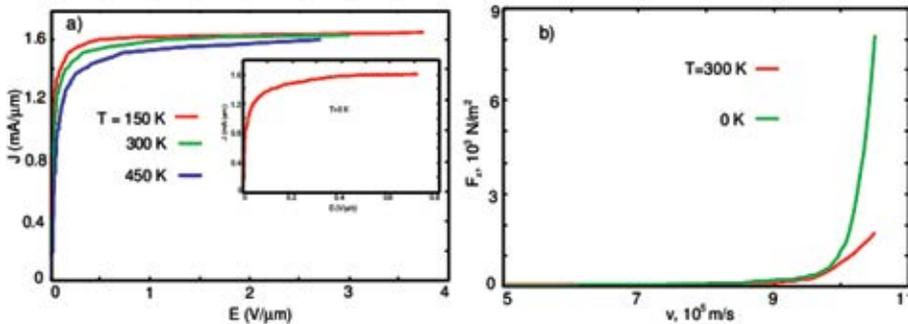
**СИЛЫ КАЗИМИРА МЕЖДУ НАНОСТРУКТУРАМИ.**



**Рис. 1.** Силы Казимира между графеновыми листами при концентрации носителей заряда  $n=10^{16} \text{ м}^{-2}$ . (a) Зависимость силы Казимира от расстояния  $d$  между графеновыми листами. Тепловой и квантовые вклады в силу Казимира показаны раздельно. Тепловой вклад показан для  $T=600 \text{ К}$  и дрейфовых скоростях  $v=0$  и  $v=2 \times 10^6 \text{ м/с}$ . (b) Зависимость тепловых вкладов в силу Казимира от скорости дрейфа носителей заряда в одном графеновом листе при  $d=1 \text{ нм}$ .



**Рис.2.** Сила фрикционное увлечения между двумя графеновыми листами при концентрации носителей заряда  $n=10^{12} \text{ см}^{-2}$ . Графики при конечных температурах показывают только тепловой вклад в силу трения. (a) Зависимость силы трения между графеновыми листами от скорости дрейфа носителей заряда, индуцируемой в одном графеновом листе, при расстоянии между листами  $d=1 \text{ нм}$ . (b) То же самое, что и на (a), но при  $d=10 \text{ нм}$ .



**Рис.3.** Роль взаимодействия между оптическими фононами в SiO<sub>2</sub> и свободными носителями заряда в графене в электрических характеристиках графеного полевого транзистора. Расстояние между графеном и SiO<sub>2</sub> равно  $d=3,5$ , концентрация свободных носителей заряда  $n=10^{12}\text{ см}^{-2}$ . (a) Зависимость плотности тока от напряженности

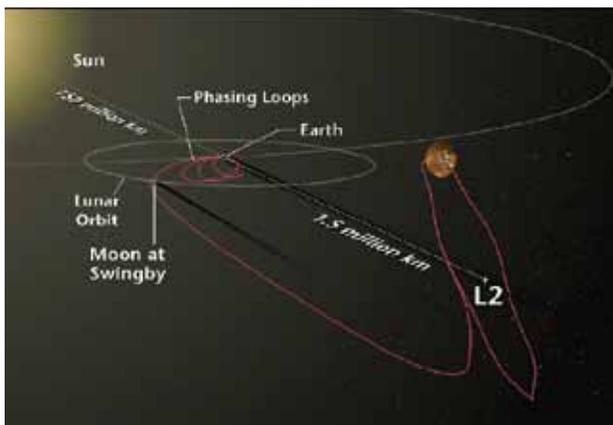
К статье А.И. Верходанова

## РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ: ЧИТАЕМ КОД ВСЕЛЕННОЙ

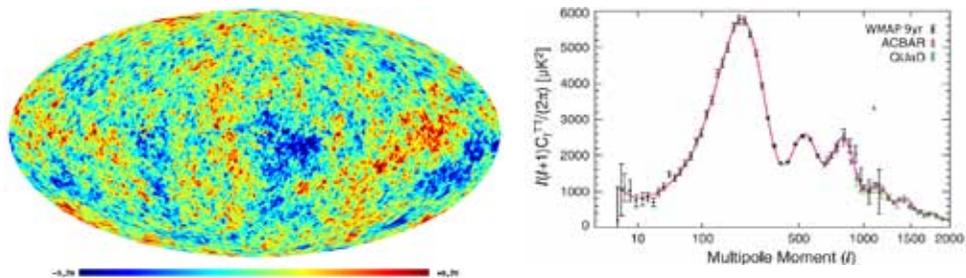
**Рис.1.**

Справа: зонд WMAP.

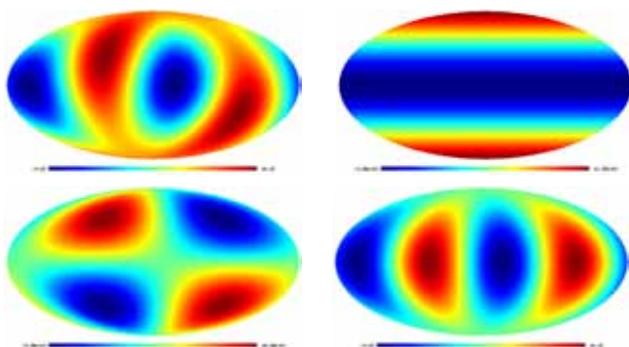
Слева: зонд Planck



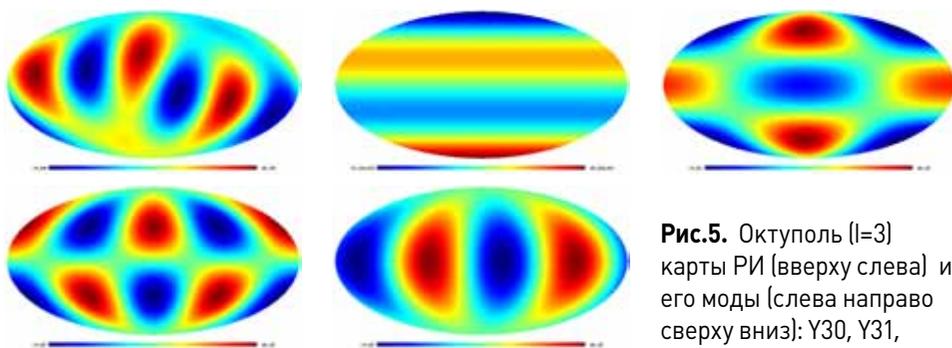
**Рис.2.** Траектория пролета и орбита спутника WMAP.



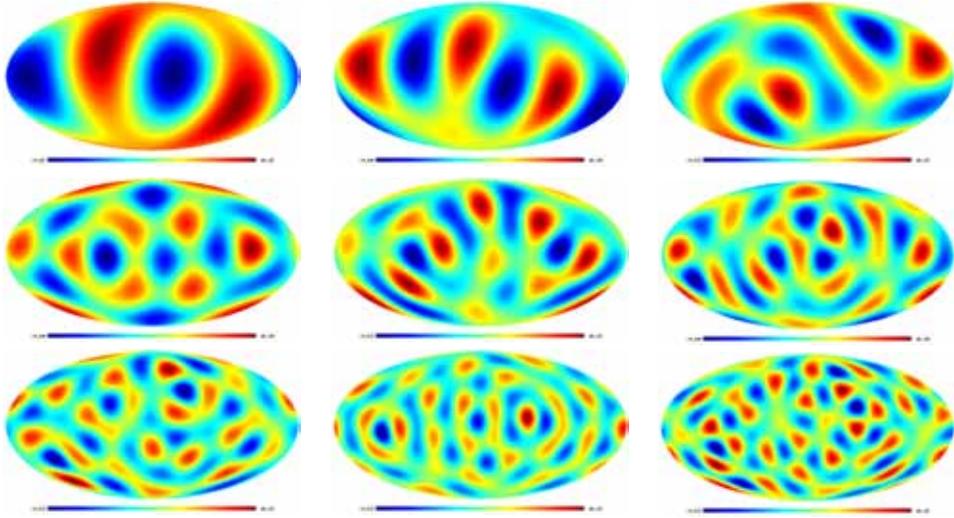
**Рис.3.** Слева: карта РИ, построенная по данным WMAP 9-го года в галактических координатах. Справа: угловой спектр мощности  $l(l+1)C_l / 2\pi$  карты WMAP [4]. На рисунке также приведены результаты измерения углового спектра мощности флуктуаций температуры в экспериментах ACBAR и Quid. Сплошной линией показан модельный спектр для космологической модели  $\Lambda$ CDM.



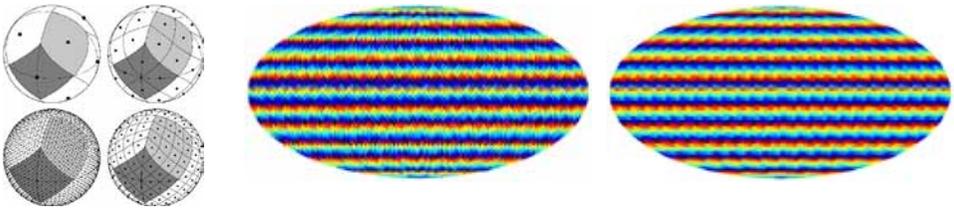
**Рис.4.** Квадруполь ( $l=2$ ) карты РИ (вверху слева) и его моды: Y20 (вверху справа), Y21 (внизу слева) и Y22 (внизу справа).



**Рис.5.** Октуполь ( $l=3$ ) карты РИ (вверху слева) и его моды (слева направо сверху вниз): Y30, Y31, Y32, Y33



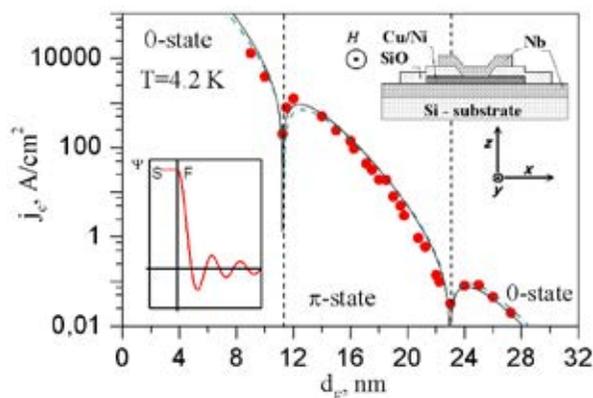
**Рис.6.** Мультиполи ( $l=2,3,4,5,6,7, 8,9,10$ ) карты РИ WMAP



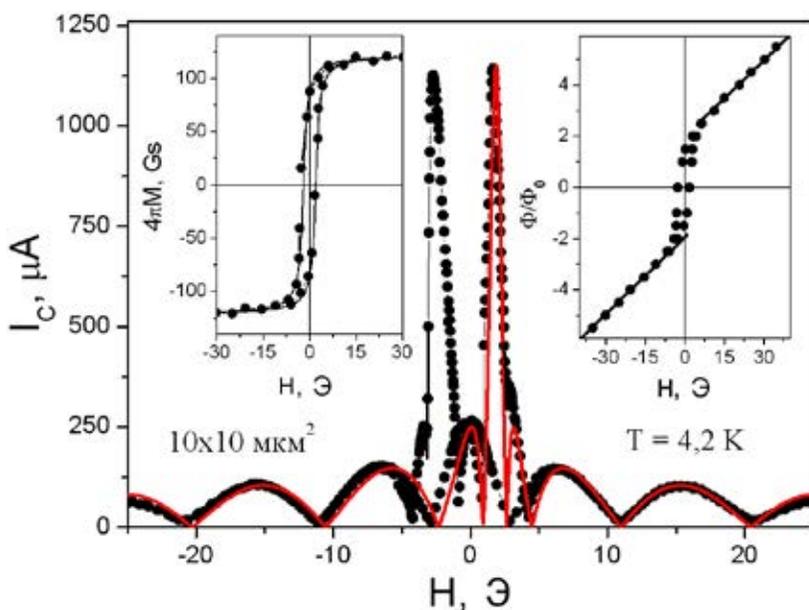
**Рис.7.** Слева: схема HEALPix. Сфера иерархически мозаично разбита на криволинейные четырехугольники. Самое низкое разрешение соответствует 12 базовым пикселям. Разрешение мозаики возрастает при делении каждого пикселя на 4 новых. На рисунке показано (по часовой стрелке от положения сверху-слева к положению снизу-слева) увеличение разрешения за 3 шага от базового уровня, т.е. сфера разбивается соответственно на 12, 48, 192, и 768 пикселей. Площади всех пикселей с данным разрешением одинаковые. В центре и справа: пример формы и расположения элементов соответственно в пикселизациях HEALPix и GLESP в эллипсоидальной проекции.

К статье В.В. Большинова

### ДЖОЗЕФСОНОВСКИЕ ПЕРЕХОДЫ С ФЕРРОМАГНИТНЫМ БАРЬЕРОМ ДЛЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ



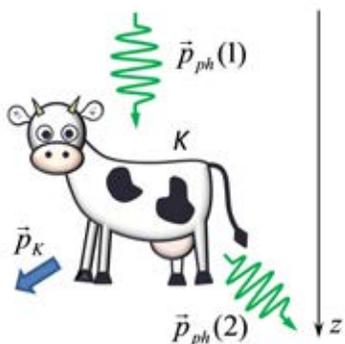
**Рис.1.** Возвратная зависимость критического тока SFS-контактов Nb-CuNi-Nb от толщины барьера согласно работе [8]. На вставке справа схематически показано поперечное сечение образцов, а также направление магнитного поля и координатных осей. На вставке слева схематически представлены осцилляции сверхпроводящей волновой функции в окрестности SF-границы



**Рис.2.** Полевая зависимость критического тока для образца Nb-PdFe-Nb размером 10x10 мкм, полученная изменением магнитного поля от +80 Э до -80 Э и обратно. Красная линия показывает аппроксимацию фраунгоферовой зависимости, учитывающей гистерезисное перемагничивание F-слоя. На вставке справа показана полевая зависимость магнитного потока через контакт, а слева – полевая зависимость намагниченности барьера, восстановленная из экспериментальной кривой  $I_c(H)$ .

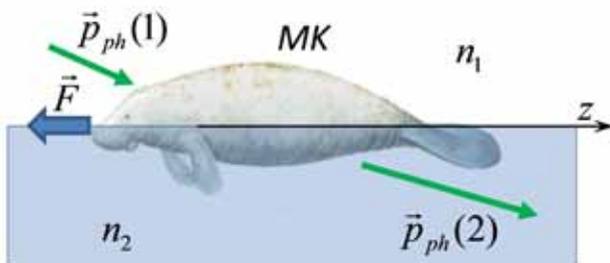
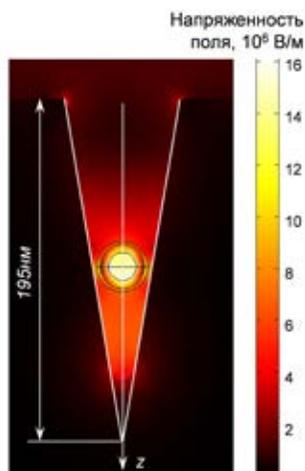
К статье С.В. Сухова, А.С. Шалина

## ЛУЧИ ПРИТЯЖЕНИЯ

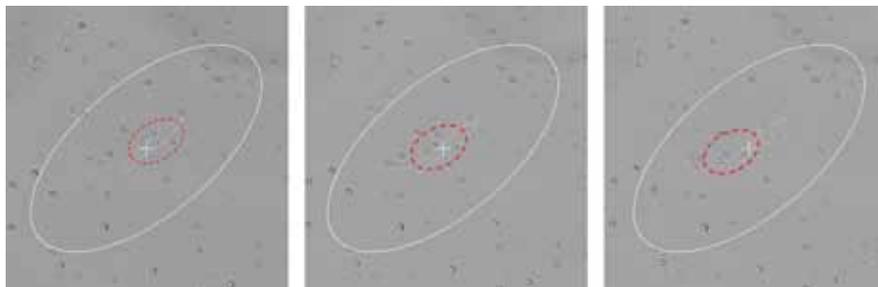


**Рис. 1.** Сохранение импульса при рассеянии света. Падающий фотон с импульсом  $\vec{p}_{ph}(1)$ , первоначально распространяющийся вдоль направления  $z$ , рассеивается на объекте  $K$  и отклоняется от первоначальной траектории, приобретая импульс  $\vec{p}_{ph}(2)$ . В результате этого рассеяния объект получает импульс с компонентой вдоль первоначального распространения фотона ( $p_K^z \geq 0$ )

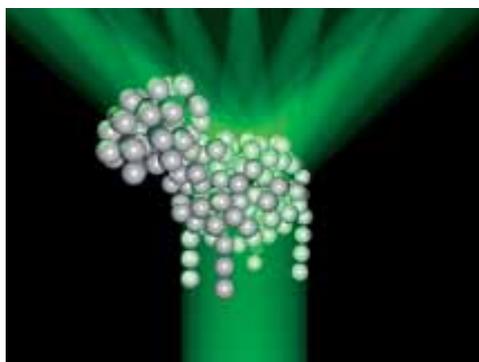
**Рис. 2.** Распределение напряженности электрического поля в плазмонной наноантенне, внутри которой находится сферическая композитная (двухслойная) наночастица. Канавка освещается сверху, при этом частица выталкивается из области сильного поля в направлении противоположном распространению внешней волны



**Рис. 3.** Возникновение сил притяжения при рассеянии фотона в оптически более плотную среду. Падающий фотон с импульсом  $\vec{p}_{ph}(1)$ , первоначально распространяющийся в среде 1, рассеивается на объекте МК и переходит в среду 2 с показателем преломления большим показателя преломления первой среды  $n_2 > n_1$ . Импульс фотона во второй среде увеличивается ( $\vec{p}_{ph}(1) > \vec{p}_{ph}(2)$ ), в результате чего на объект начинает действовать сила притяжения по направлению к источнику

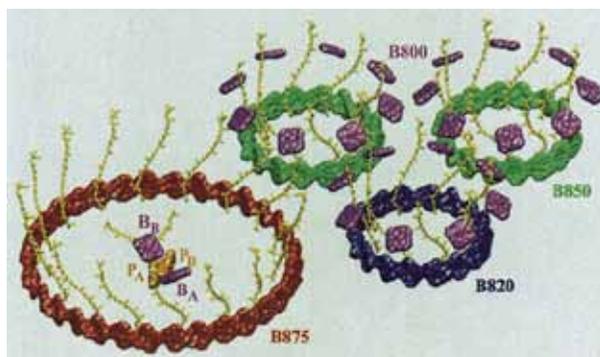


**Рис. 4.** Серия кадров, показывающая перемещение масляных капель по водной поверхности под воздействием внешнего излучения. Светлый эллипс характеризует контуры облучающего пучка, стрелка показывает направление распространения луча. Время между кадрами – 7,5 секунд. Капли вблизи центра луча (внутри штрихованной окружности) движутся в направлении обратном направлению распространения луча

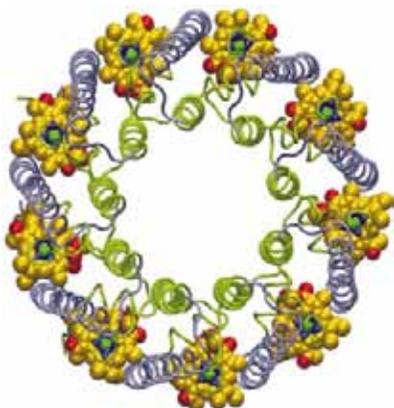


**Рис. 5.** Луч притяжения для непоглощающих сильно рассеивающих объектов. Подстраивая фазу сходящихся под определенным углом волн, можно добиться усиления рассеяния света преимущественно в одном направлении, создавая силу притяжения.

К статье В.В. Еремина, А.С. Белова, И.О.Глебова, В.В.Поддубного  
**КОГЕРЕНТНЫЕ И ДИССИПАТИВНЫЕ ПУТИ ФОТОСИНТЕЗА**



**Рис.1.** Расположение хромофоров в фотосинтетическом устройстве пурпурной бактерии. Красным цветом показаны хромофоры LH1, зеленым – LH2, синим – LH3, желтым – каротиноиды. Внутри антенны LH1 изображены хромофоры реакционного центра [5]

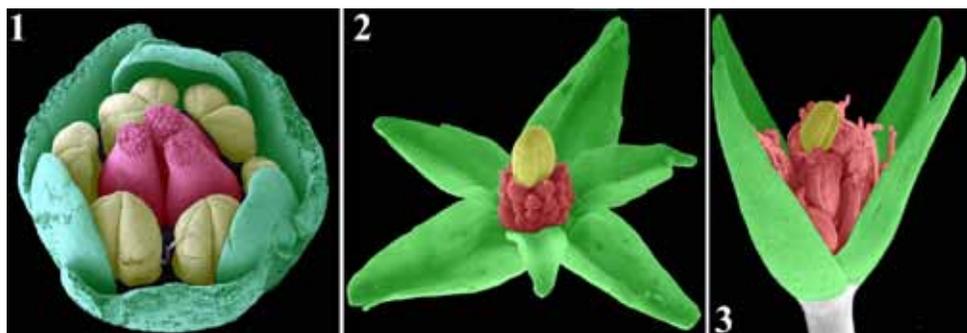


**Рис. 2.** Белковое окружение хромофоров В800 в фотоантенне LH2 пурпурной бактерии *Rps. acidophila*. Хромофоры изображены желтым, зеленые и синие спирали показывают вторичную структуру белка [8]

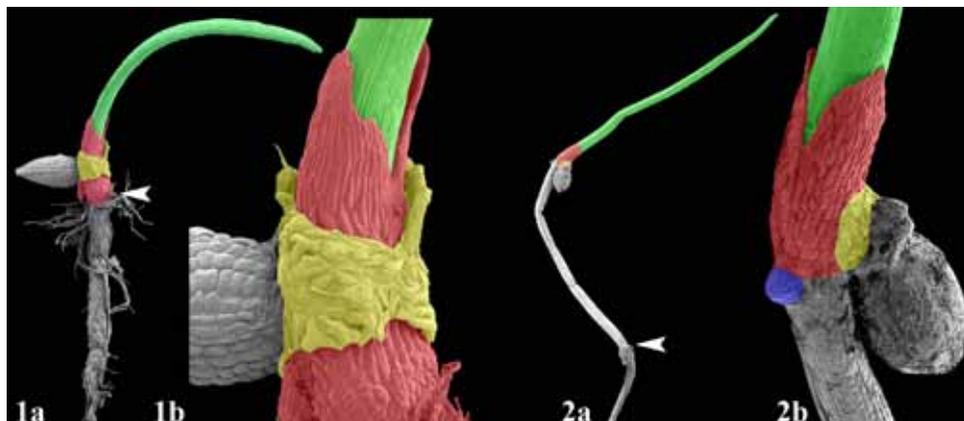
К статье Ремизовой М.В.

### СЧИТАЕМ ДО ДВУХ: ЧИСЛО СЕМЯДОЛЕЙ У ГИДАТЕЛЛОВЫХ – НЕОБЫЧНЫХ РОДСТВЕННИКОВ КУВШИНОК

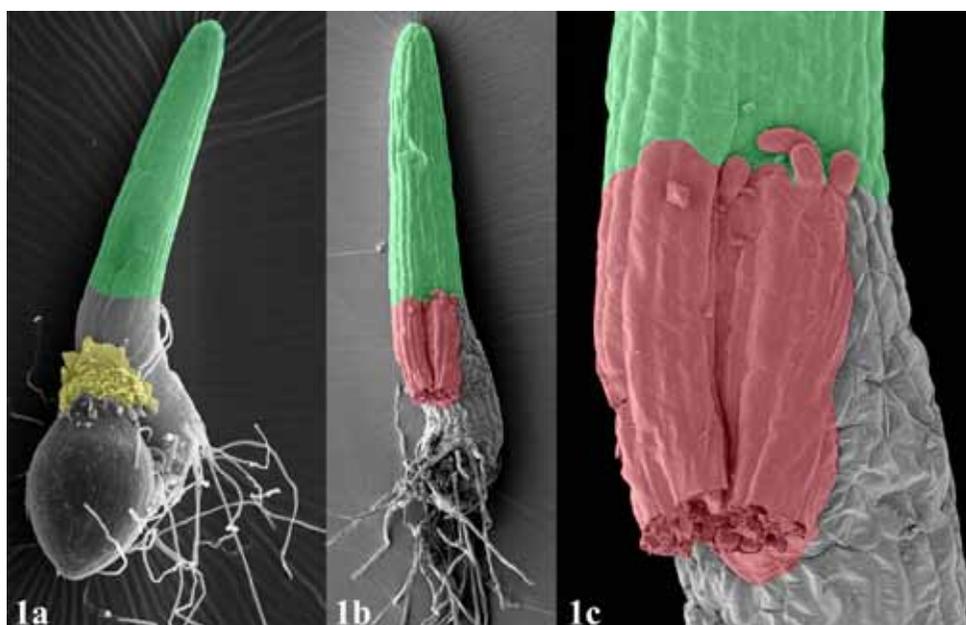
**Рис. 1.** Внешний вид цветущих Гидателловых, род Тритурия: *Trithuria cowieana* (1) и *Trithuria lanterna* (2). Снимки сделаны автором в природных популяциях в Северной Австралии



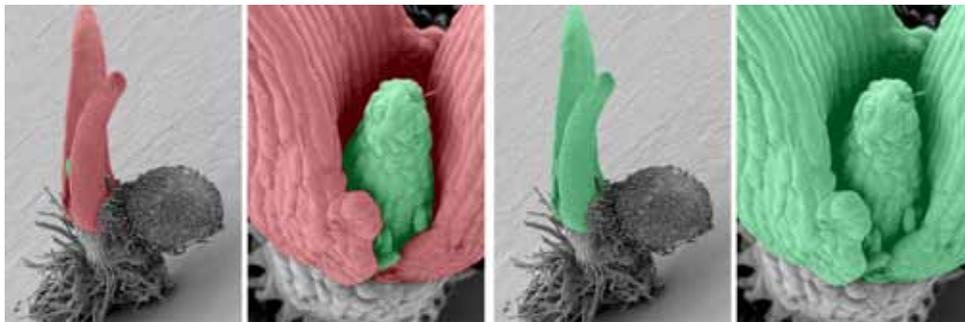
**Рис. 2.** Внешний вид цветущих Гидателловых, род Тритурия: *Trithuria cowieana* (1) и *Trithuria lanterna* (2). Снимки сделаны автором в природных популяциях в Северной Австралии



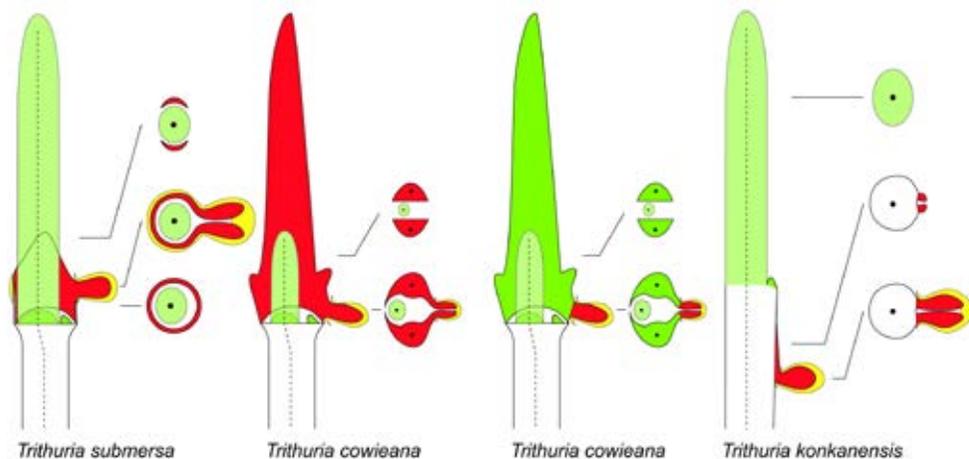
**Рис. 3.** Проростки Гидателловых из первой группы: *Trithuria submerse* (1) и *Trithuria austinensis* (2). Зеленым показан первый лист, красным – семядоли, желтым – эндосперм, который выдвигается за пределы семени при его прорастании, синим – первый придаточный корень. Стрелка указывает на положение корневой шейки. У *Trithuria austinensis* между корневой шейкой и семядольным узлом находится подсемядольное колено (гипокотиль). Рисунок на основе черно-белых иллюстраций в [22]



**Рис. 4.** Проростки Гидателловых из второй группы: *Trithuria konkanensis*. Зеленым показан первый лист, красным – семядоли, желтым – эндосперм, который выдвигается за пределы семени при его прорастании. Рисунок на основе черно-белых иллюстраций в [27]

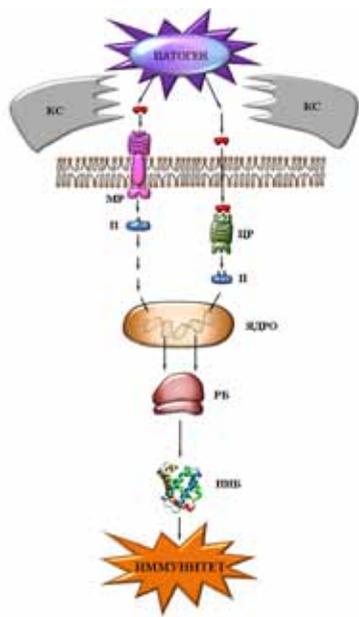


**Рис. 5.** Проростки Гидателловых из третьей группы (*Trithuria cowieana*), раскрашенные в соответствии с гипотезой 1 (1) и гипотезой 2 (2). Зеленым показаны листья, красным – семядоли. Рисунок на основе черно-белых иллюстраций в [27]



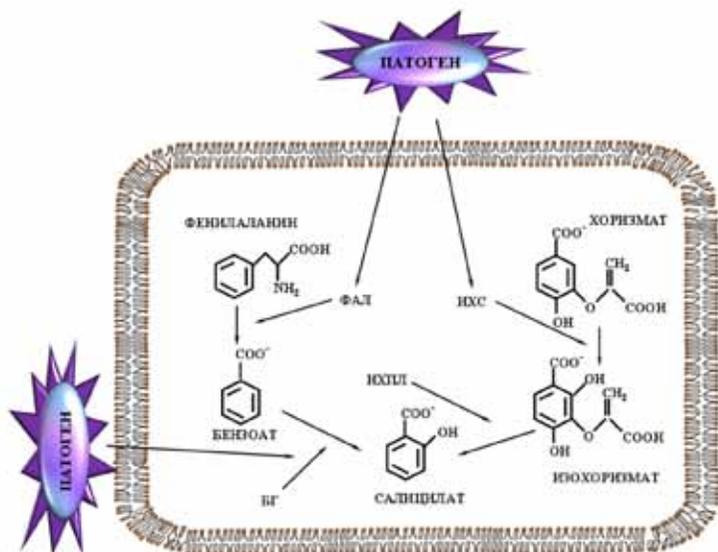
**Рис. 6.** Разнообразие проростков Гидателловых. *Trithuria submersa* относится к группе 1, *Trithuria konkanensis* – к группе 2, *Trithuria cowieana* – к группе 3. Проросток *Trithuria cowieana* раскрашен в соответствии с двумя гипотезами. На схемах показан продольный разрез и поперечные срезы на разных уровнях. Зеленым показаны листья, красным – семядоли, желтым – эндосперм. По [27], с изменениями

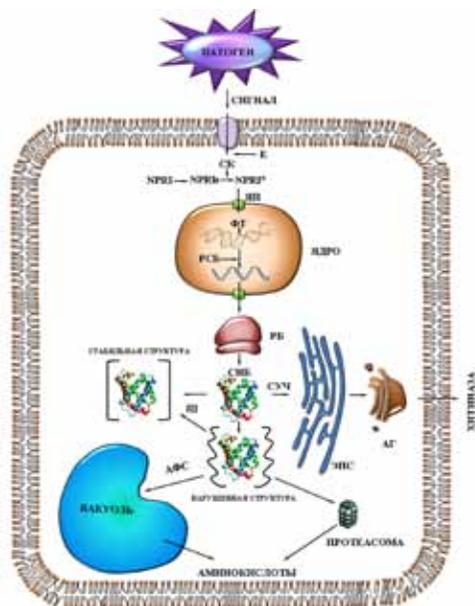
К статье Тарчевского И. А. Яковлевой В.Г., Егоровой А.М., Петровой Н.В.  
**КАК САЛИЦИЛОВАЯ КИСЛОТА ПОМОГАЕТ РАСТЕНИЯМ СОЗДАВАТЬ  
 ИММУНИТЕТ ПРОТИВ БОЛЕЗНЕТВОРНЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ**



**Рис. 1.** Схема последовательности реакций защитного ответа клеток растений на инфицирование. КС – клеточная стенка, частично ферментативно разрушенная патогеном; МР – мембранный рецептор; ЦР – цитоплазматический рецептор; П – посредники передачи сигнала от патогенна в ядро; РБ – рибосома; ПИБ – патоген-индуцируемые белки

**Рис. 2.** Активирующее действие патогенов на ферменты синтеза салицилата. ФАЛ – фенилаланин-аммиаклиаза; ИСХ – изохоризмат синтаза; ИХПЛ – изохоризмат пируватлиаза; БГ – бензоат гидроксилаза

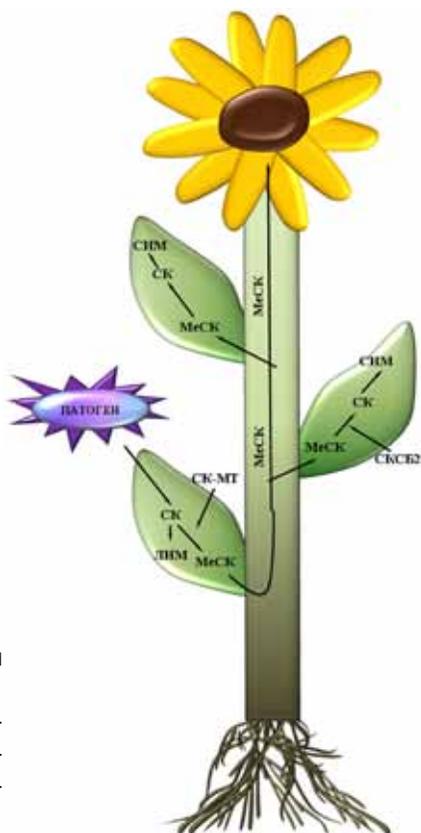




**Рис. 3.** Влияние салициловой кислоты на судьбу новообразованных белков. Е – ферменты синтеза салициловой кислоты; NPR1<sub>o</sub> – олигомерная форма NPR1; ЯП – ядерная пора; ФТ – факторы транскрипции; РСБ–РНК – связывающие белки; РБ – рибосома; СИБ – салицилат-индуцируемые белки; СУЧ – сигнал-узнающая частица; Ш – шапероны; ЭПС – эндоплазматическая сеть; АГ – аппарат Гольджи; АФС – автофагосома



**Рис. 4.** Схема влияния адапторного белка на взаимодействие не «узнающих» друг друга белков. А – адапторный белок; Б и В – взаимодействующие белки



**Рис. 5.** Роль метилсалицилата в появлении системного иммунитета.

СК – салициловая кислота; СК-МТ – салицилатметилтрансфераза; MeСК – метилсалицилат; ЛИМ – локальный иммунитет; СИМ – системный иммунитет

К статье Махрова А.А., Болотова И.Н., В.С. Артамоновой В.С.

## ЕВРОПЕЙСКАЯ ЖЕМЧУЖНИЦА - ВИД, КОТОРОМУ ТРУДНО ПРИСПОСАБЛИВАТЬСЯ



**Рис. 1.** Жемчужница в карельской реке. Фото И.В. Вихрева



**Рис. 2.** Устье реки Кереть. Фото О.В. Хайминой



**Рис. 3.** Оклад иконы «Всех скорбящих Радость». 1763. Монастырь Новый Валаам. Фото И.В. Вихрева



**Рис.4.** Молодь кумжи (сверху) и семги. Фото В.С. Артамоновой

**Рис. 5** Остатки лесосплавной плотины.  
Фото В.С. Артамоновой



К статье Володина И.А., Володиной Е.В.  
**ЕМНОГО ОЛЕНЕЙ, ХОРОШИХ... НО РАЗНЫХ!**



**Рис. 1.** Крупный и мелкий представители восточных оленей

а) сибирский марал

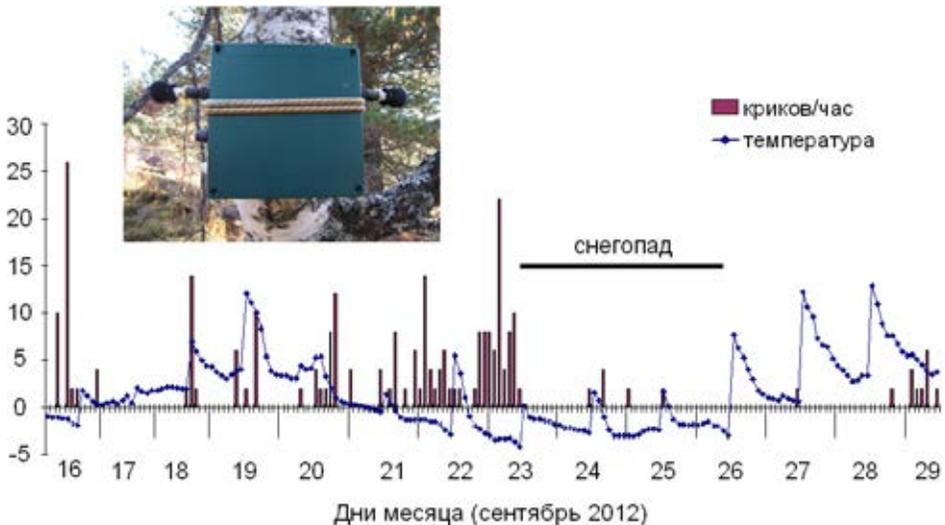
б) карликовый американский вапити. У обоих хорошо видна шейная грива

в) бухарский олень, представитель центральной-ветви

г) восточноевропейский олень, представитель западной ветви

У обоих шейная грива отсутствует.

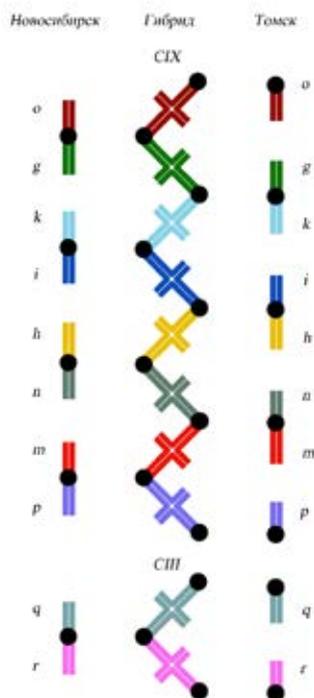
Восточноевропейский олень кричит, оттянув кадык.



**Рис. 2.** Прибор для автоматической записи звука, закрепленный на дереве, и график активности гона сибирских маралов в горной Хакасии в период с 16 по 29 сентября 2012 г. (числа месяца показаны на оси X). Число криков увеличивалось при снижении температуры, однако гонная активность практически прекратилась во время трех очень холодных дней со снегопадом [18].

К статье Полякова А.В, Бородина П.М.

**ОБЫКНОВЕННАЯ БУРОЗУБКА И ЕЕ ВНУТРИВИДОВЫЕ ГИБРИДЫ**



**Рис. 1.** Формирование комплексов хромосом CIX и CIII у гибридов между новосибирской и томской хромосомными расами обыкновенной бурозубки

К статье Козловой Л.В.

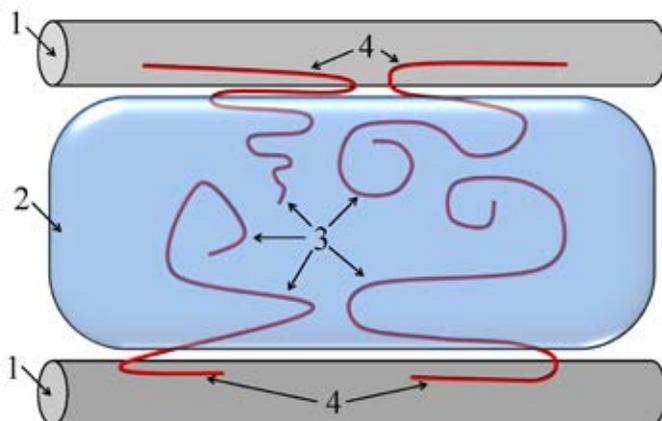
**КАК РАСТЯНУТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОН?**

**Рис. 1**

Предположительное строение клеточных стенок второго типа в растягивающихся клетках.

1 – микрофибриллы целлюлозы;  
 2 – гель, сформированный глюканом со смешанным типом связей;

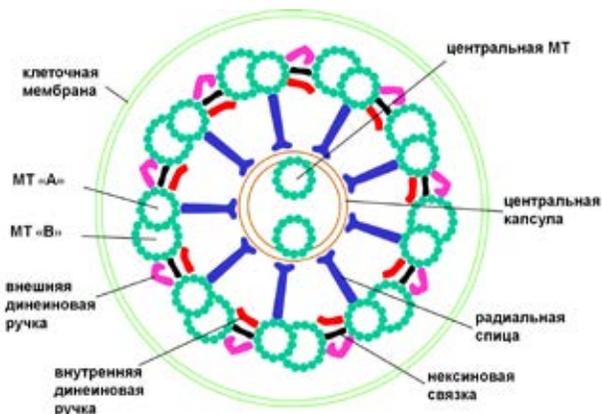
3 – фрагмент глюкуроноарабиноксилана, находящийся между микрофибриллами и препятствующий взаимодействию последних; 4 – фрагмент глюкуроноарабиноксилана, взаимодействующий с микрофибриллами



К статье Узбекова Р.Э., Алиевой И.Б.

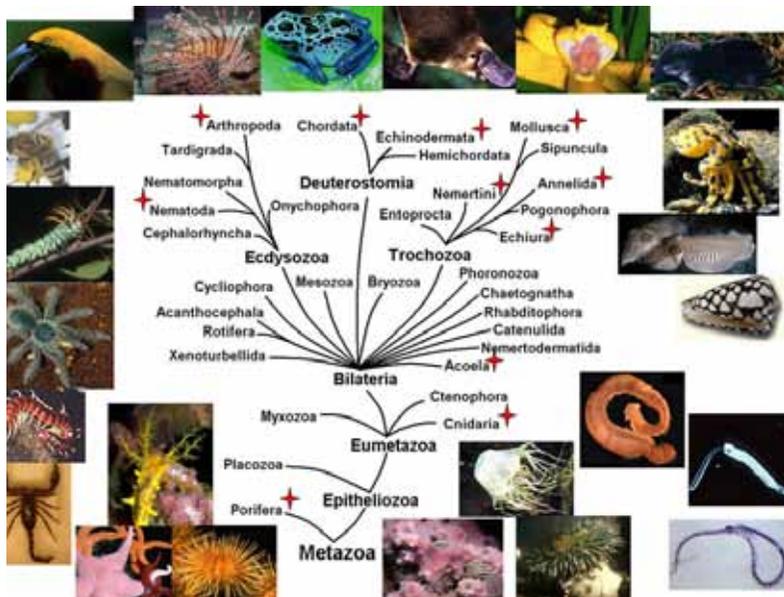
## РЕСНИЧКИ И ЖГУТИКИ – ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВО, ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЕ ФУНКЦИИ

**Рис. 1.** Схема строения подвижной реснички на поперечном срезе, проходящем через «основную зону»

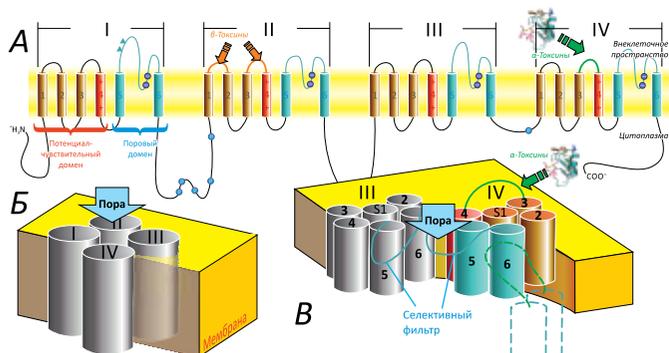


К статье Чугунова А.О., Василевского А.А.

## ЭВОЛЮЦИОННАЯ «ГОНКА ВООРУЖЕНИЙ»: НЕЙРОТОКСИНЫ VERSUS ИОННЫЕ КАНАЛЫ

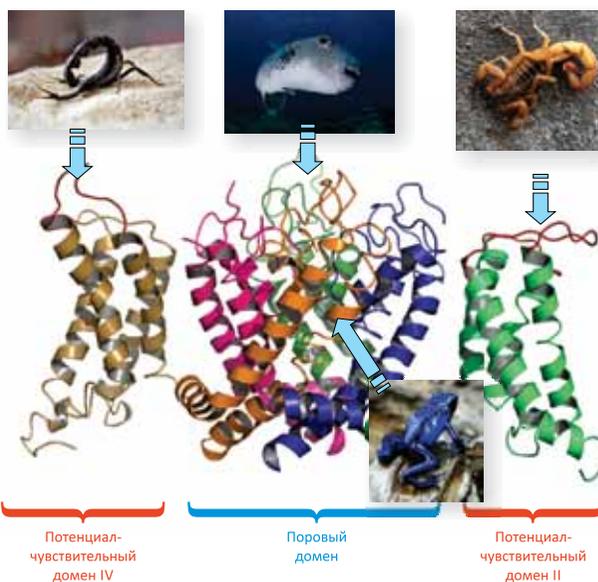


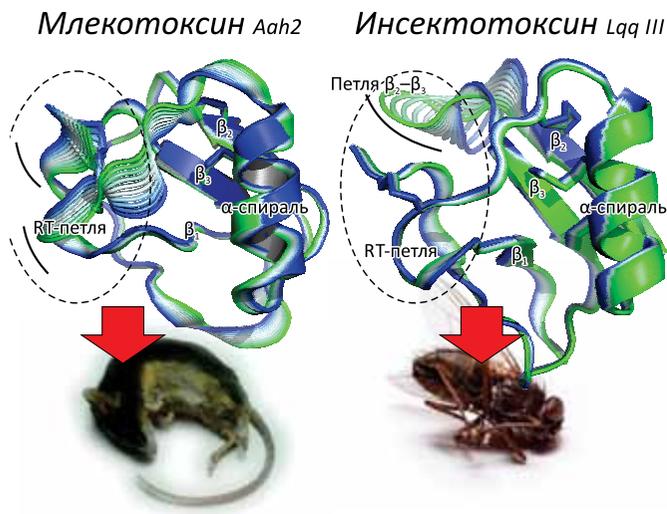
**Рис. 1.** Разнообразие ядовитых животных. На филогенетическом дереве многоклеточных отмечены типы животных, среди представителей которых встречаются ядовитые. Вокруг дерева расположены фотографии ядовитых животных (сверху — позвоночных, слева — членистоногих, слева внизу — губок, справа сверху — моллюсков, справа внизу — кишечнополостных и некоторых червей).



**Рис. 1.** Строение потенциал-чувствительных натриевых каналов (ПЧНК). А. ПЧНК состоит из четырех похожих повторов (I–IV). Каждый повтор содержит шесть трансмембранных α-спиралей (S1–S6). Четыре спирали (S1–S4) формируют потенциал-чувствительный домен (ПЧД). Единственный поровый домен (ПД) образован восемью спиральями, по две (S5–S6) от каждого повтора. Четвертая спираль в каждом ПЧД (S4) положительно заряжена и выполняет роль сенсора потенциала. С внеклеточной стороны с ПЧД-IV и ПЧД-II связываются α- и β-токсины скорпионов. Б. В пространстве повторы ПЧНК располагаются вокруг общей оси. В. Центральный ПД канала образован восемью спиральями, а ПЧД расположены дистально. Участок между спиральями S5 и S6 содержит «селективный фильтр», опосредующий избирательное пропускание ионов Na<sup>+</sup>

**Рис.2.** Некоторые природные нейротоксины, воздействующие на ПЧНК. Изображена модель пространственной организации канала, показан центральный ПД и два ПЧД (II и IV). Представлены фотографии ядовитых животных, служащих источником «классических» нейротоксинов. Тетродотоксин из рыбы фугу блокирует пору ПЧНК, связываясь с внеклеточной стороны. Бат-рахотоксин из кожи Колумбийской лягушки проникает через мембрану и встраивается внутрь поры канала, вызывая его активацию. α-Токсины скорпионов связываются с ПЧД-IV и подавляют процесс естественной инактивации каналов. β-Токсины скорпионов связываются с ПЧД-II и активируют ПЧНК.





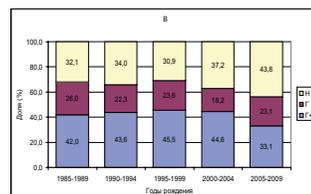
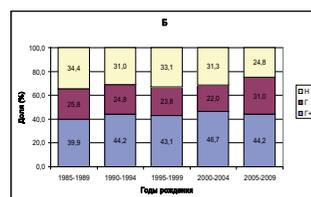
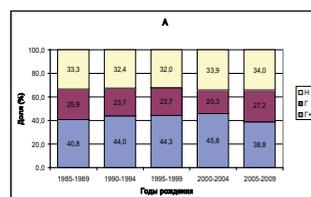
вижный «модуль специфичности» (показан пунктирным овалом), отличающийся у млеко- (слева) и инсектотоксинов (справа). Рисунок показывает результаты анализа характерных внутренних движений по данным молекулярной динамики. Цветной спектр конформаций изображает динамическую подвижность каждой из молекул.

К статье И.Г. Удиной, О.Л. Курбатовой, Ю.А. Васильева, А.С. Прудникова, А.Ф. Верапатвелян, О.В. Гуленко

### ОШИБКИ ПРИРОДЫ: «ВОЛЧЬЯ ПАСТЬ» И «ЗАЯЧЬЯ ГУБА» ПОБЕЖДЕНЫ?



**Рис.1.** Распределение районов Краснодарского края по частоте встречаемости ВПР ЧЛО.

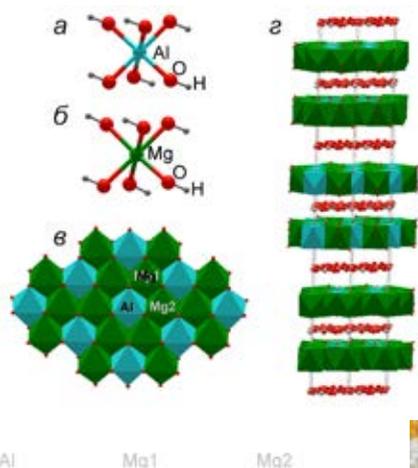


**Рис. 2.** Динамика соотношений диагнозов ВРГ (Г), ВРН (Н) и ВРГН (Г+Н) по пятилетиям. А – суммарная выборка; Б – мальчики; В – девочки

**Рис. 3** Модульная структура  $\alpha$ -токсинов скорпионов. Эти токсины — небольшие белки, составленные из  $\beta$ -листа и  $\alpha$ -спирали, скрепленных дисульфидными связями. Такая жесткая и эволюционно консервативная структура образует «кор» (сердцевину) молекулы, а две петли и С-конец образуют динамически подвижный «модуль специфичности» (показан пунктирным овалом), отличающийся у млеко- (слева) и инсектотоксинов (справа). Рисунок показывает результаты анализа характерных внутренних движений по данным молекулярной динамики. Цветной спектр конформаций изображает динамическую подвижность каждой из молекул.

К статье Кривичева С.В.

**МИНЕРАЛЫ КАК МАТРИЦЫ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ: ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗЫ**

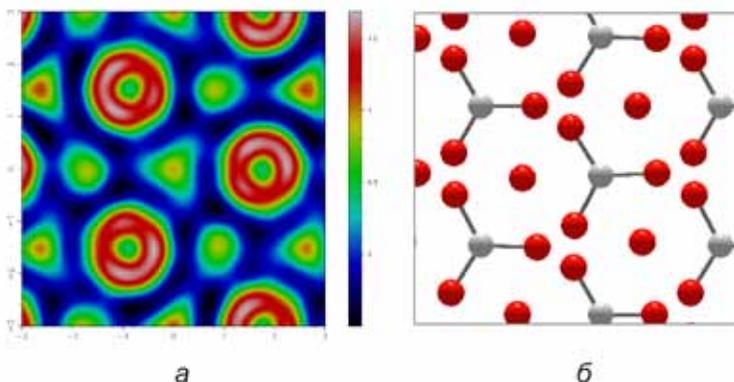


**Рис. 1.** Пример кристаллической структуры слоистого двойного гидроксида – квинтинита из Ковдорского железорудного месторождения:

(а, б) – основные структурные элементы – октаэдры Mg(OH)<sub>6</sub> и Al(OH)<sub>6</sub>; (в) – объединение октаэдров в слои; (г) структура, вид сбоку (красные и серые атомы между слоями – атомы кислорода и углерода, соответственно)



**Рис. 2.** Кристаллы квинтинита из Ковдорского железорудного месторождения. Фото В.Н. Яковенчука и Г.Ю. Иванюка

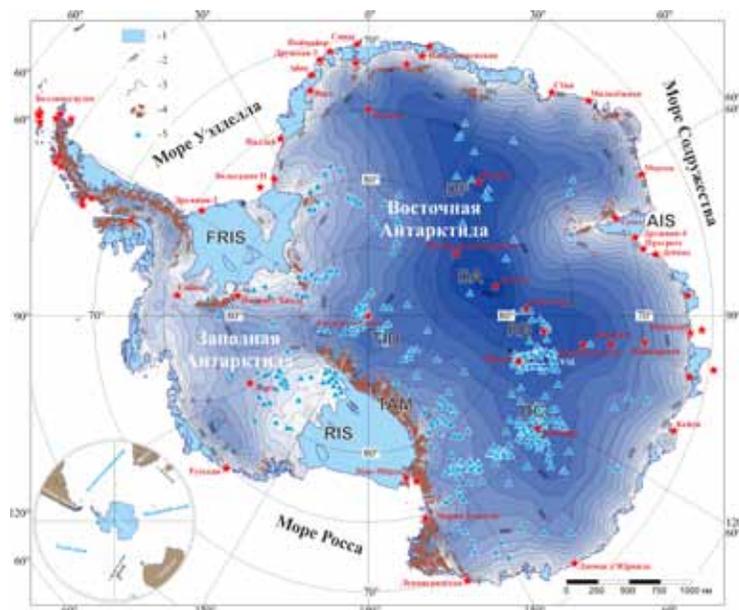


**Рис.3.** Распределение электронной плотности в межслоевом пространстве ковдорского квинтинита (а) и модель расположения атомов (б): атомы углерода показаны серым, кислорода – серым цветом; отрезки, соединяющие атомы углерода и кислорода показывают ориентацию связей C-O)

кислорода – серым цветом; отрезки, соединяющие атомы углерода и кислорода показывают ориентацию связей C-O)

К статье С.В. Попова

## ДВА ЧУДА АНТАРКТИЧЕСКОГО ОЗЕРА ВОСТОК

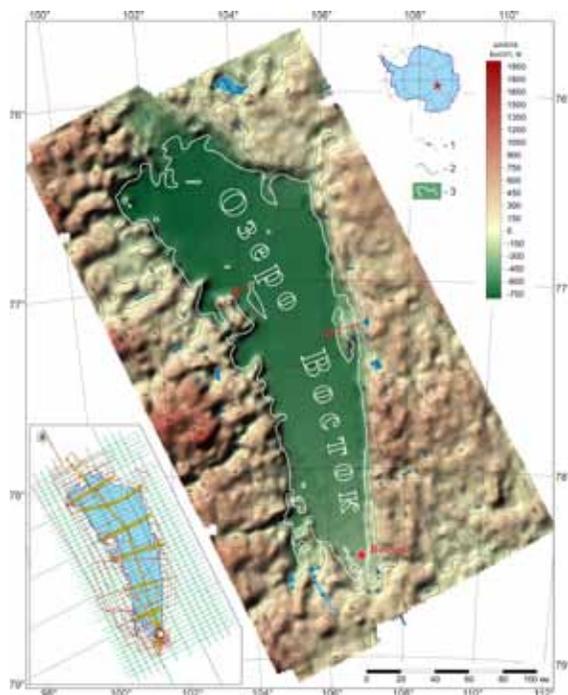


**Рис.1.** Дневная поверхность Антарктиды и подледниковые водоёмы

1 – шельфовые ледники по [8]; 2 – изогипсы высот дневной поверхности по [12]; сечение изолиний 250 м; 3 – береговая линия и границы шельфовых ледников по [8]; 4 – выходы каменных пород на поверхность ледника по [8]; 5 – подледниковые водоёмы по [7, 19]. Буквенные сокращения: AIS – шельфовый ледник Эймери; DA – Купол Аргус; DC – Купол Конкордия; DF – Купол Фуджи; FRIS – шельфовый ледник Фильхнера-Ронне; RB – ледораздел Б; RIS – шельфовый ледник Росса; TAM – Трансантарктические горы; TID – Купол Титан



**Рис.2.** Наземная передвижная геофизическая лаборатория «Витязь»



**Рис.3.** Подледный рельеф района озера Восток:

1 – изогипсы подледного рельефа; сечение изолиний 150 м;  
 2 – уровень моря;  
 3 – береговая линия озера Восток; голубым цветом показаны подледниковые водоемы. На секции а приведена схема расположения использованных геофизических данных; красным цветом показаны отечественные радиолокационные маршруты; зеленым – маршруты американской съемки; желтые точки – пункты сейсмических зондирований МОВ.

К статье Войтеховского Ю.Л.  
**АСИММЕТРИЯ –  
 ВОТ ДОСТОЙНАЯ ПРОБЛЕМА!**



**Рис. 1.** Tumi-ishi. Правила игры очевидны.

К статье Косьян А.Р.  
**АЗИАТСКАЯ  
 ИММИГРАНТКА  
 В ЧЕРНОМ МОРЕ**



**Рис. 1.** Раковины рапаны с косы Тузла (слева) и окрестностей Туапсе (справа). Стрелками указаны нерестовые метки на раковине



**Рис. 2.** Точки сбора моллюсков для исследований. 1 – Тарханкут; 2 – Донузлав; 3 – Севастопольская бухта; 4 – Карадаг; 5 – коса Тузла; 6 – Анапа; 7 – Голубая бухта (вход в бухту); 8 – Голубая бухта (пирс); 9 – детский центр «Орленок»; 10 – Сочи

*К статье Леухина А.Н.*

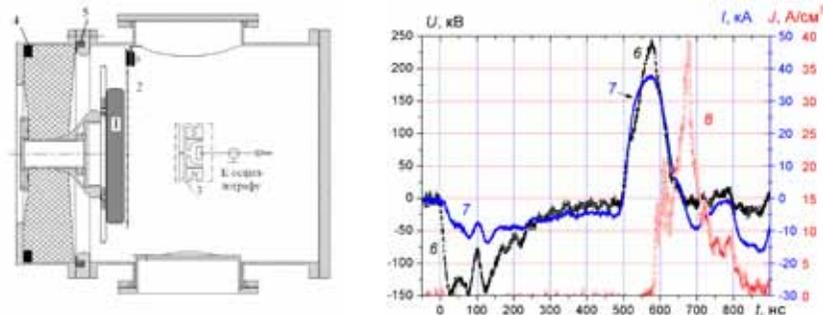
### **ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ ПОСТРОЕНИЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ БАРКЕРА**



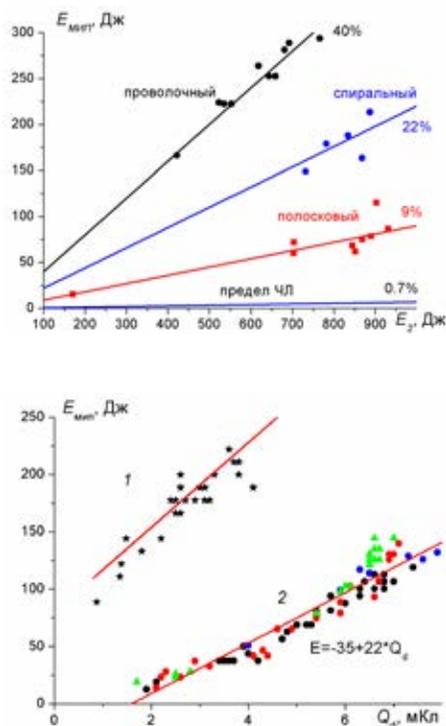
**Рис. 1.** Профессор С.Голомб с автором статьи профессором А.Н.Леухиным

К статье Пушкарева А.И., Исаковой Ю.И., Хайлова И.П.

### ГЕНЕРАЦИЯ МОЩНЫХ ИОННЫХ ПУЧКОВ



**Рис. 1.** Схема диодного узла: потенциальный электрод (1), заземленный электрод (2), коллимированный цилиндр Фарадея (3), пояс Роговского (4 и 5). Осциллограммы ускоряющего напряжения (6), полного тока диода (7) и плотности ионного тока (8)

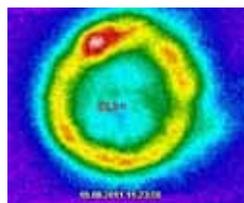


**Рис. 4.** Зависимость полной энергии МИП от полного заряда, переносимого в диоде в течение генерации МИП: 1 – данные для спирального диода при реализации замкнутого дрейфа электронов; 2 – данные для диодов с незамкнутым дрейфом электронов (полосковые и конусный), сводные данные при А-К зазоре 7 (.), 8 (7), 9 (x) и 10 (!) мм.

**Рис. 2.** Зависимость энергии МИП от энергии, поступающей в диодный узел, для диодов разной конструкции



**Рис.3.** Фотография проволочного диода: потенциальный электрод (1), заземленный электрод (2). Термограмма ионного пучка, формируемого проволочным диодом



1  
2

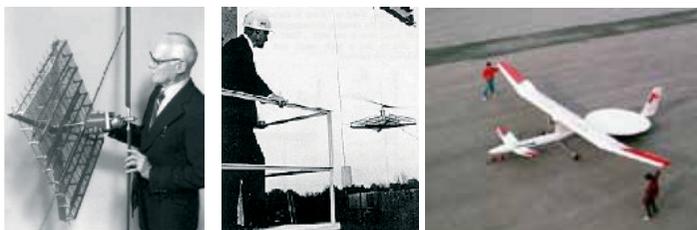
К статье Капанова В.В., Тугаенко В.Ю.

## БЕСПРОВОДНАЯ ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ЗЕМЛЕ И В КОСМОСЕ



**Рис. 1.** Эксперименты Тесла ( а) Схема экспериментов Nevada Lightning Lab; б) Демонстрация системы WiTriCiti; в) модель устройства WiTriCiti для дома)

**Рис. 2.** Развитие микроволнового метода БПЭ ( а,б) W.C. Brown с моделью вертолёта, питаемой от микроволнового генератора мощностью 200 Вт, на частоте 2,45 ГГц; в) Рис.7. Беспилотный летательный аппарат (UAV) с беспроводным электропитанием мощностью 10 кВт на частоте 2,45 ГГц)



**Рис. 3.** Концепция летательного аппарата с микроволновым электропитанием Mugarbo.



**Рис. 5.** Военные приложения БПЭ ( а) Боинг YAL-1 — экспериментальный боевой самолёт, способный с помощью бортового лазера уничтожать объекты противника; б) Корабельная лазерная система Raytheon



**Рис. 4** Схема работы системы LaserMotive для поддержки беспилотного аппарата



**Рис. 6** Схематичный рисунок схемы беспроводной передачи энергии между МКС и КА