

«УТВЕРЖДАЮ»

ВРИО директора Федерального  
государственного бюджетного учреждения науки  
Институт геологии и минералогии им. В.С.  
Соболева Российской академии наук

д.г.-м.н. В.Н. Реутский

« 17 » мая 2018 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки (ФГБУН)  
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН  
Проспект академика Коптюга, 3, ФГБУН ИГМ СО РАН  
630090, Российская Федерация, г. Новосибирск  
e-mail: [director@igm.nsc.ru](mailto:director@igm.nsc.ru), [science@igm.nsc.ru](mailto:science@igm.nsc.ru)

### О Т З Ы В

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Российской академии наук  
на диссертационную работу Е.В. Гершелис «Геохимические особенности органического  
вещества донных осадков в морях Восточной Арктики»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук  
по специальности 25.00.09 – Геохимия, геохимические методы поисков полезных  
ископаемых

Диссертационная работа Гершелис Елены Владимировны представляет собой пример комплексного научного подхода к оценке роли органического вещества в процессах седиментогенеза и начального этапа диагенеза осадочного материала в морях Восточной Арктики. Заявленная соискателем цель исследования предполагает в итоге ответы на весьма нетривиальные и сложные вопросы об источниках, составе и генезисе органического вещества. Как известно, для выявления источников поступления органического вещества в морские донные осадки или осадки континентальных водоемов определяют первичную продукцию в современных биоценозах, тем самым устанавливая автохтонные источники осадочного материала (Романкевич, 1977, 2001; Ветров, Романкевич, 2008, 2014; Sakshaug, 2004; Lee et al, 2012; Леонова и др., 2015; Ермолаева и др., 2017 и др.). Выявление генезиса захороненного (фоссилизированного) органического вещества как в поверхностном горизонте донных осадков, так и по глубине осадочной толщи – задача исключительно сложная и требует комплексного подхода с привлечением специальных методов анализа, а также критериев и маркеров, косвенно подтверждающих генетическую связь захороненного органического вещества осадков с исходным органическим материалом – автохтонным (водными организмами) или аллохтонным (наземной растительностью) (Пересыпкин и др., 2003, 2006, 2009; Меленевский и др., 2011, 2015, 2018; Леин и др., 2000, 2009, 2011; Беляев, 2015; Леонова и др., 2017, 2018 и др.). Для решения поставленных задач Гершелис Е.В. использовала комплекс таких органо-геохимических показателей, как содержание органического углерода, молекулярный состав алифатических углеводов (n-алканов) в качестве биомаркеров аквагенного и терригенного органического вещества, изотопный состав углерода и водорода в качестве маркера биогенного или термогенного метана.

**Актуальность** работы определяется недостаточной изученностью природных механизмов функционирования арктических биогеохимических экосистем на региональном уровне – морей Восточной Арктики как высокоперспективного арктического

региона. Именно органическое вещество современных донных осадков, аккумулирующее гетерогенные сигналы различных процессов транспорта и трансформации углерода, является индикатором уникальных региональных особенностей седиментогенеза и диагенеза осадков. Использование наборов высокоточных молекулярных и изотопных инструментов позволяет получить важную информацию о вкладе аллохтонной и автохтонной компоненты в состав органического вещества, уточнить особенности его распределения, в том числе в зонах документированной активной разгрузки восходящих газовых флюидов, и, таким образом, внести вклад в фундаментальные вопросы понимания отдельных элементов современного арктического цикла углерода. Наряду с фундаментальным значением важным является и прикладное значение проведенных исследований. Получение новых данных о геохимических особенностях органического вещества донных осадков, идентификации возможных источников углеводородов в поверхностном слое являются необходимыми этапами исследований арктической экосистемы с позиции нефтегазопроисводительной геохимии.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы и заключения. Диссертация включает 143 страницы, 9 таблиц и 36 рисунков. Список литературы насчитывает 230, из которых 131 на иностранных языках.

**Во введении** обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследования, показана научная новизна, практическая значимость работы, формулируются положения, выносимые на защиту, показан личный вклад автора.

**Глава 1 «Краткая история исследований»** содержит обзор литературных данных по современному состоянию изученности донных осадков морей Восточной Арктики, в том числе и по вопросам распределения и состава органического вещества. Особо отмечена фундаментальная работа Н.Б. Вассоевича (1973), где впервые обобщены и сформулированы главные закономерности, характеризующие органическое вещество ископаемых и современных осадков, а также фундаментальная работа Е.А. Романкевича в соавторстве с А.А. Ветровым (2001) по исследованию цикла органического углерода в арктических морях России. В качестве одного из наиболее важных направлений исследований компонентов цикла углерода в Восточной Арктике соискатель отмечает изучение и оценку масштабов массивированной эмиссии метана в водную толщу и атмосферу, вызванную деградацией подводной мерзлоты и разрушением метановых гидратов (Shakhova et al. 2010, 2014, 2015, 2017). При прочтении данной главы складывается вполне ясное представление о масштабах и уровне современных исследований в данном регионе не только отечественных, но и зарубежных ученых.

**Вторая** глава «*Современные донные осадки арктических морей*» также представляет литературный обзор по разделам, освещающим вопросы основных источников поставки органического вещества в морские донные осадки моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря и роли биомаркеров в выявлении этих источников, а также диагенетическим и катагенетическим процессам, выступающим в роли источников углеводородных газов, в том числе метана.

Детально рассмотрены все основные источники поставки органического вещества: 1) за счет первичной продукции фитопланктона (автохтонный источник); 2) за счет речного стока (аллохтонный – терригенный источник, представленный продуктами разложения растений и почв, древней органики, высвобождающейся при разрушении мерзлых пород, подстилающих дренажный речной бассейн); 3) разрушение береговой линии и высвобождение древнего эрозионного  $C_{org}$  (терригенный источник); 4) миграция углеводородов из глубинных залежей в результате диффузионно-фильтрационного массопереноса. Все указанные источники подтверждаются ссылками на литературные источники российских и зарубежных исследователей.

По литературным данным обосновывается биогеохимическая реконструкция исходного органического вещества с использованием биомаркеров как трассирующих элементов при воссоздании обстановок осадконакопления, что обеспечивает более полное

понимание источников и механизма трансформации органического материала в процессе диагенеза. В обзоре охарактеризованы основные углеводородные маркеры («нефтяные углеводороды»), которые могут быть идентифицированы в донных осадках и указывать, в том числе, на предполагаемую нефтегазоносность подстилающих горизонтов. Делается акцент на том, что наиболее важное значение для решения поставленных в диссертационной работе задач имеют реликтовые углеводороды (биомаркеры), не утратившие черты строения исходных биологических молекул, к числу которых относятся нормальные и изопреноидные алканы, циклические изопреноиды (стераны, тритерпаны и др.). Данная глава весьма внушительна по объёму (30 страниц), однако это оправдано, т.к. представляет теоретический базис для последующей интерпретации собственных научных результатов соискателя.

**Глава 3 «Район исследований»** включает сведения о физико-географической характеристике территории расположения изучаемых морей Восточной Арктики и геолого-тектоническом строении. Подчеркиваются особенности исследуемого района, которые определяются их высокоширотным положением и существованием криолитозоны, хранящей в себе огромный запас лабильного реликтового органического вещества, легко вовлекаемого в современный биогеохимический цикл. Делается акцент на том, что в последние десятилетия увеличение скорости роста температуры в арктическом регионе провоцирует сокращение ледового покрова, увеличение речного стока и ускорение деградации мерзлоты. Отмечено, что на формирование гидрологической и гидрохимической структуры вод восточноарктических морей и пресноводный баланс исключительное влияние оказывают речной сток. Он обуславливает сильную плотностную стратификацию вод, слабое ветровое перемешивание и интенсивное сезонное колебание солёности воды.

Обращается внимание на выделении учеными категории арктических шельфовых газгидратов в особую группу, особенностью которых является большая плотность пространственного залегания, высокое внутрипоровое насыщение, относительно низкая теплоемкость фазового перехода, и, соответственно, значительно более высокая чувствительность к изменениям термического режима. Отмечается, что в период трансгрессии, газгидраты переходят в нестационарные термобарические условия, что приводит к нарушению их стабильности, скоплению свободного газа из дестабилизированных газгидратов и выход газового флюида.

На основании анализа литературных данных показано, что значительная часть Восточно-Сибирского арктического шельфа представляет собой беспрецедентный источник метана в атмосферу региона, по объёму эмиссии сопоставимый с вкладом Мирового океана. В пространственном распределении растворенного метана прослеживаются четко очерченные зоны наиболее высоких концентраций метана, превышающие средние на 1-2 порядка.

**Глава 4 «Фактический материал, методология и методы работ».** Диссертация Гершелис Е.В. базируется на большом фактическом материале, полученном в нескольких морских и прибрежно-морских экспедициях в период 2011-2017 гг., в том числе и с её участием. Пробы поверхностных донных осадков отобраны дночерпателем van Veen и гравитационным пробоотборником GEMAX, 41-метровый керн получен бурением скважины в Ивашкиной лагуне моря Лаптевых с помощью установки «УРБ-4Т». Газогеохимические исследования проводились на материале ОАО «ТомскНИПИнефть». Общий объем образцов донных осадков, исследованных в рамках диссертационной работы, составил 120 проб. Данные по литологическим характеристикам осадков, общему содержанию и изотопному составу органического углерода автором представлены для 83 станций, расположенных в море Лаптевых и Восточно-Сибирском море и охватывающих, таким образом, обширную часть Восточно-Сибирского шельфа.

Аналитические исследования проведены Гершелис Е.В. в период прохождения стажировок в Департаменте аналитической химии и наук об окружающей среде

Стокгольмского университета. Подготовка образцов и анализы проводились в соответствии с методиками, опубликованными в работах зарубежных коллег (Vonk et al., 2010; Tesi et al., 2014; Broder et al., 2016). Соискателем лично получены и обработаны результаты гранулометрического, хромато-масс-спектрометрического, пиролитического, изотопного анализов органического вещества донных осадков, а также анализа удельной площади поверхности зерен, определяющей их сорбционную способность.

Все аналитические процедуры выполнены на современном оборудовании: определение гранулометрических характеристик осадков на лазерном анализаторе Malvern Mastersizer 3000; значения удельной площади поверхности частиц определены с помощью автоматического анализатора удельной поверхности и пористости Micrometrics Gemini VII; общее содержание органического и минерального углерода, легколетучих органических соединений, количество продуктов деструкции биополимеров – на пиролизаторе «Rock-Eval 6 Turbo», анализ экстрактов пиролиза проведен методом хромато-масс-спектрометрии на приборе SCION 436 GC TQ; определение изотопного состава органического углерода и водорода метана углерода и водорода проведен методом GC-C-IRMS на изотопном масс-спектрометре DELTA V 69. Достоверность полученных результатов обеспечена статистически значимым количеством проб донных осадков, современной методикой их отбора и пробоподготовки, применением комплекса высокочувствительных аналитических методов, использованием современного программного обеспечения, глубиной проработки полученного материала и литературы по теме исследований, а также апробацией результатов исследований на российских и зарубежных конференциях.

**Глава 5 «Результаты исследования донных осадков морей Восточной Арктики»** предваряется довольно детальным литературным обзором по литологии донных осадков на Восточно-Сибирском арктическом шельфе. Проанализировав исследования своих предшественников, соискатель подчеркивает основную особенность осадконакопления в изучаемом регионе: повсеместное доминирование дисперсных осадков на шельфе, что обусловлено особенностями рельефа и спецификой материала, поставляемого из терригенной области сноса. Далее идет пояснение, что именно геоморфология формирует особый гидродинамический режим осадконакопления: продолжительная устойчивая подледная седиментация обеспечивает накопление преимущественно тонкодисперсных осадков вне зависимости от их удаленности от побережья. Своими результатами (Рисунок 5.1) Гершелис Е.В. подтверждает выдержанность дисперсной структуры донных осадков в море Лаптевых и в Восточно-Сибирском море, свидетельствующей об устойчивой «подледной» обстановке осадконакопления.

Соискателем получены новые данные по распределению  $C_{орг}$  в поверхностных донных осадках Восточно-Сибирского арктического шельфа (Рисунок 5.4 б), которые дополняют данные предыдущих исследований (Shakhova et al., 2017; Дударев и др., 2006, 2016). Оценку сохранности органического вещества в осадках исследуемых морей Гершелис Е.В. проводит по отношению  $C_{орг} / S_{уд}$ , позволяющему установить концентрацию органического углерода на единицу площади поверхности частицы осадка, или, другими словами, оценить общую «загрузку» осадков органическим веществом в различных условиях осадконакопления. Применительно к региону исследования, на большей части акватории значения параметра  $C_{орг} / S_{уд}$  изменяются в пределах 0,3-0,7 мгС<sub>орг</sub>/м<sup>2</sup> (Рисунок 5.5), наиболее низкие коэффициенты отмечаются на глубоководных станциях. В районе авандельты реки Лены соискателем установлено резкое возрастание углеродной загрузки до 2,2 мг С<sub>орг</sub>/м<sup>2</sup>, что обусловлено интенсивным экспортом наземного органического вещества в результате береговой эрозии и речного стока.

Для уточнения вклада различных источников в состав органического углерода донных осадков на территории шельфа исследуемых морей Е.В. Гершелис использует изотопный состав ( $\delta^{13}C_{орг}$ ) полученных по результатам своих исследований и заимствованных их литературных источников (Tesi et al., 2014; Broder et al., 2016). Значения  $\delta^{13}C_{орг}$  варьировались в пределах -27,4 ‰ и -20,85 ‰, демонстрируя тренд обогащения

стабильным изотопом углерода по мере удаления от береговой линии и увеличения влияния автохтонной (морской) компоненты органического вещества (Рисунок 5.6). Сравнение данных по изотопному составу углерода и параметру  $C_{орг}/S_{уд}$  позволили соискателю выявить тенденцию относительно равномерного замещения терригенного органического углерода морским веществом с увеличением расстояния от берега по увеличению доли тяжелого изотопа  $C_{орг}$ .

Фундаментальную значимость представляют полученные Е.В. Гершелис данные пиролитического анализа Rock-Eval, а также значения водородного индекса HI, характеризующего водородонасыщенность органического вещества и отражающего долю алифатической составляющей. Это позволило сделать заключение, что на лаптевоморском полигоне доминирует вклад терригенного материала в составе органического вещества (Рисунок 5.10в). Лишь отдельные образцы характеризуются незначительно повышенными значениями индекса HI ( $>100$ ), что указывает на присутствие морской компоненты. Соотнесение максимальной температуры выделения углеводородов  $T_{max}$  (при которой отмечается максимальная скорость выхода углеводородов, генерируемых в результате термической деструкции) и водородного индекса HI также подтверждает бесспорное преобладание окислительных (континентальных) условий осадконакопления органического вещества (Рисунок 5.10г).

Большой фрагмент в данной главе посвящен детальному рассмотрению молекулярного состава захороненного (фоссилизированного) органического вещества в осадках. Е.В. Гершелис дает геохимическую интерпретацию по n-алканам, в том числе по соотношению гомологов с четным и нечетным количеством атомов углерода в молекуле, что позволяет определить тип биопродукта органического вещества и условия его фоссилизации. Вместе с тем, соискатель подчеркивает, что достоверное установление типа биопродукта можно провести только при комплексной интерпретации нескольких геохимических параметров, что отражено ею в таблице 5.3. Такой общепризнанный в органической геохимии параметр, как индекс нечетности CPI, практически во всех исследованных образцах имеет высокие значения ( $>>2$ ), что указывает на слабую диагенетическую преобразованность органического вещества, тем самым, маркирует постоянное поступление в осадки свежего органического материала неморского, а наземного происхождения. Пониженное значение CPI отмечается только для одной станции (№44,  $CPI=1,91$ ), находящейся непосредственно в зоне документированного газового выхода. Кроме того, повышенные значения другого параметра, как Pr/Ph (соотношение изопреноидов с n-алканами), также подтверждают преимущественно окислительную обстановку осадконакопления, то есть значительный вклад наземного ОВ.

В качестве дополнительного геохимического параметра соискатель использует содержание серы в осадках. Выявлено, что повышенное образование серы на станциях, расположенных непосредственно в зонах метановой разгрузки, в среднем, в 1.3 раза выше, чем на «фоновых» станциях. Такая особенность может быть связана с процессами сульфатредукции, более интенсивно протекающими в активных газывыводящих областях. Делается заключение, что метан в зонах его выхода потребляется не только аэробными метанотрофами, но также подвергается анаэробному окислению сульфатредуцирующими бактериями.

Особо хочется отметить раздел данной главы по оценке изменчивости молекулярного состава органического вещества в процессе накопления толщи осадков по результатам исследования 18-метрового интервала керна скважины VD-13, пробуренной в районе авандельты реки Лена в центральной части Ивашкиной лагуны (Рисунок 4.1). Результаты пиролитического исследования (Таблица 5.6.) демонстрируют скачки значений водородного (HI) и кислородного (OI) индексов, что указывает на резкую смену обстановки осадконакопления с восстановительной на окислительную или на вклад аллохтонного глубоко окисленного материала (интервалы 12,28-12,90 м и 10,23-11,26 м). Установлено, что доминирующий вклад в органическую компоненту дает экспорт наземного материала:

в распределении n-алканов преобладают гомологи C<sub>27</sub>, C<sub>29</sub>, C<sub>31</sub> – маркеры высшей наземной растительности. На преимущественно терригенный генезис органического вещества исследованных осадков также указывают низкие значения параметров соотношения низкомолекулярных и высокомолекулярных гомологов [C<sub>14</sub>-C<sub>19</sub>/C<sub>14</sub>-C<sub>35</sub>], [C<sub>15</sub>+C<sub>17</sub>+C<sub>19</sub>/C<sub>27</sub>+C<sub>29</sub>+C<sub>31</sub>], а также индексы соотношения четных и нечетных n-алканов CPI, OEP<sub>17</sub>, OEP<sub>19</sub>. Присутствие четных гомологов n-алканов указывает на автохтонный биогенный вклад свежесинтезированного органического вещества – трансформацию высокомолекулярных n-алканов в результате микробиальной деятельности. Показано, что с увеличением глубины залегания осадка вклад низкомолекулярных гомологов, характерных для гидробионтов и планктоногенного органического вещества уменьшается.

Полученная соискателем информация по изотопному анализу газов представляет компиляцию собственных результатов и представительного массива данных, приведенных в публикации (Sapart et al., 2017). Для идентификации источника метана интерпретация данных проводилась соискателем на основе классической «диаграммы Витикара», где выделены три ключевых механизма его образования: ацетокластический метаногенез, восстановление углекислоты и катагенетическое преобразование органического вещества (Whiticar, 1999). По данным Е.В. Гершелис изотопный состав углерода метана, извлечённого из поверхностных донных осадков в исследуемом регионе, изменяется в широких пределах от -65 до -103‰, а изотопный состав водорода – в диапазоне от -200 до 350‰, что относит флюид преимущественно к области газов с бактериальным генезисом (Рисунок 5.23). Делается заключение, что полученные результаты изотопного анализа позволяют рассматривать природу гидратов как микробиальную.

**В Заключение** приводятся основные выводы проведенного исследования.

**Научная новизна** диссертационного исследования Е.В. Гершелис не вызывает сомнений: получены новые данные по содержанию органического углерода на обширной территории Восточно-Сибирского шельфа с применением дополнительного параметра – удельной площади поверхности зерен осадка, как одного из ключевых факторов, контролирующих его сорбционную способность. На основании комплексного анализа массива геохимических данных выявлены основные источники органического вещества в исследуемом районе, а также установлены признаки возможной миграции углеводородов из нижележащих глубинных толщ. Проведённый изотопный анализ углерода и водорода метана указал на преимущественно микробиальную природу газа.

**Теоретическая значимость работы** сводится к тому, что установленные Е.В. Гершелис геохимические особенности донных осадков шельфа Восточной Арктики, в том числе определение молекулярного и изотопного состава углеводородных соединений, уточняют региональные закономерности седиментации и распределения органического вещества, вносят вклад в установление источников органического вещества в зонах разгрузки газовых флюидов и на сопредельных территориях. Отсюда вытекает **практическая значимость** полученных результатов для решения прикладных задач нефтегазопромышленной геохимии в Восточной Арктике.

Однако имеются некоторые замечания, в основном редакторского характера, которые не умаляют проведенного Е.В. Гершелис диссертационного исследования:

1) Представляется целесообразным в работе дать отдельным списком сокращения (аббревиатуры) и расшифровку условных обозначений, в том числе индексов молекулярного состава и специфичных компонентов органического вещества в экстрактах пиролиза, проанализированных методом хромато-масс спектрометрии и далее идентифицируемых по масс-спектрометрическим библиотекам NIST 14 и другой справочной литературе, поскольку такой список расшифрованных сокращений облегчил бы работу с рецензируемой диссертацией; 2) Ожидалось увидеть предположительную оценку полученных результатов исследования в прикладном аспекте нефтегазопромышленной геохимии изученного шельфа морей Восточной Арктики. Относительно нефтематеринских

свойств органического вещества исследованных осадков можно предположить, что они в принципе не могут являться потенциально нефтематеринскими ввиду низких значений водородного индекса (СНІ), обусловленных аллохтонным характером органического вещества осадков (см. таблицы 5.2, 5.6).

### Резюме

Представленная к защите работа Елены Владимировны Гершелис является законченным научным исследованием, в основу которого положен представительный фактический материал, отобранный лично диссертантом. Защищаемые положения корректно сформулированы и обоснованы. Основные положения диссертации в полной мере отражены в пяти статьях в журналах из списка ВАК и апробированы на российских и международных конференциях. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы. Диссертационная работа Е.В. Гершелис полностью отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Область проведенного исследования полностью соответствует пунктам паспорта специальности 25.00.09 – Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Ведущий научный сотрудник Лаборатории  
геохимии благородных и редких  
элементов и экогеохимии

доктор геол.-мин.наук

Г.А. Леонова

Диссертация рассмотрена на заседании научного семинара лаборатории геохимии благородных и редких элементов и экогеохимии.

Отзыв рассмотрен и одобрен в качестве официального на заседании Ученого совета Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, «17» мая 2018 г., протокол № 6.

Зам. председателя Ученого совета,  
д.г.-м.н.

В.Н. Реутский

Ученый секретарь,  
к.г.-м.н.

Д.А. Самданов



**ПОДПИСЬ УДОСТОВЕРЯЮ**

17.05.2018