

**ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ**



На правах рукописи



Новоселов Андрей Андреевич

**ГЕОХИМИЯ ВОД И ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОГО
МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ В БЕССТОЧНЫХ ОЗЕРАХ
ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ ЗАУРАЛЬЯ И ИШИМСКОЙ РАВНИНЫ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

1.6.4 – Минералогия, кристаллография. Геохимия, геохимические
методы поисков полезных ископаемых

Томск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский государственный университет»

Научный руководитель: **Хорошавин Виталий Юрьевич**

кандидат географических наук, доцент, директор Института наук о Земле, Тюменский государственный университет

Официальные оппоненты: **Страховенко Вера Дмитриевна**

доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии благородных и редких элементов, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск); профессор кафедры минералогии и геохимии геолого-геофизического факультета, Новосибирский государственный университет (г. Новосибирск)

Субетто Дмитрий Александрович

доктор географических наук, декан факультета географии, заведующий кафедрой физической географии и природопользования, Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена (г. Санкт-Петербург)

Защита состоится 7 февраля 2024 г. в 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.26 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634028, г. Томск, проспект Ленина, дом 2а, строение 5 (учебный корпус № 20, аудитория 504)



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода

Автореферат разослан «____» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного
к.г.-м.н.

совета

ДС.ТПУ.26

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Bulat Rinchinovich'.

Соктоев Булат Ринчинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Лесостепные и степные озера широко распространены на обширной территории юга Западной Сибири, простирающейся на две тысячи километров с запада на восток и включающей несколько крупных геоморфологических районов: Зауралье, Ишимскую равнину, Барабинскую низменность и Кулундинскую равнину. Для водоемов этих регионов характерны определенные гидрохимические и гидрологические особенности, связанные с разнообразием климатических условий, рельефа и степенью антропогенного преобразования. Озера Зауралья и Ишимской равнины изучены значительно хуже по сравнению с их аналогами на юго-востоке Западной Сибири, как в контексте их геохимических особенностей, минерального состава донных отложений, так и процессов современного минералообразования. Из опубликованных работ, посвященных гидрохимическим особенностям и вещественному составу отложений водоемов лесостепной зоны запада региона, можно отметить лишь исследования минерального состава отдельных озерных систем, выполненные под руководством Д.С. Шляпникова в 80-х годах прошлого века.

Малые водоемы степной и лесостепной зон обладают высокой динамичностью и, соответственно, выступают в качестве индикаторов природных и антропогенных изменений окружающей среды. Также, эти водоемы сельскохозяйственной зоны юга Западной Сибири являются интегральным компонентом ландшафтов территории и выступают в качестве конечного звена наземных геохимических потоков. Комплексные исследования различных компонентов лимноландшафтов равнины крайне важны для мониторинга геосистем региона, а также для оценки вклада природных и антропогенных процессов в их изменения.

В международных исследованиях все большую актуальность приобретает изучение континентальных циклов углерода и роли малых водоемов семиаридной и аридной зон в их формировании. Малые высокоминерализованные бессточными озера, являются системами, в которых происходит активное формирование аутигенных минералов, в том числе карбонатов, биогенной, хемогенной и смешанной природы. Формирование данной группы минералов в донных осадках, в свою очередь, является одним из способов естественной секвестрации углерода.

Образование высокомагнезиальных карбонатов, таких как доломит ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), магнезит (MgCO_3) и гидромагнезит ($\text{Mg}_4(\text{CO}_3)_3(\text{OH})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), в современных аквальных системах относится к числу наиболее актуальных научных проблем литологии, минералогии и биогеохимии. Сущность данной проблемы заключается в том, что формирование высокомагнезиальных карбонатов при нормальном давлении и относительно низких, близких к комнатной, температурах ограничено в связи с сильно выраженными гидрофильными свойствами иона Mg^{2+} . В то же время Mg и Mg - Ca карбонаты широко распространены в древних осадочных толщах. По данной причине вопросы о возможных механизмах формирования Mg и Mg - Ca карбонатов в современных условиях, а также вероятных факторах (абиотических и биотических), влияющих на эти процессы, остаются открытыми. Результаты многочисленных исследований, представленных в международной литературе, свидетельствуют о том, что подавляющее большинство примеров современного образования высокомагнезиальных карбонатов приурочено к микробиальным матам и строматолитам, предполагая ведущую роль метаболизма микроорганизмов в формировании таких новообразований.

Так как на данный момент нет единого мнения о механизме формирования высокомагнезиальных карбонатов в современных континентальных отложениях, изучение данных процессов сохраняет актуальность. Соответственно, комплексные исследования

компонентов бессточных озер (донных отложений, вод и береговых фаций) могут внести весомый вклад в поиске ответа на этот вопрос.

Целью является выявление особенностей геохимии вод и процессов современного минералообразования в бессточных озерах лесостепной зоны Зауралья и Ишимской равнины.

При проведении исследований решались следующие **задачи**:

- установить состав и закономерности формирования вод бессточных озер пяти ключевых участков лесостепной зоны Зауралья и Ишимской равнины;
- идентифицировать и охарактеризовать процессы аутигенного минералообразования в донных отложениях водоемов, определить их интенсивность и разнообразие минерального состава отложений;
- выявить роль биогенных и биохемотронных процессов в формировании высокомагнезиальных карбонатов в бессточных водоемах.

Научная новизна работы

1. Исследован химический состав 43 малых бессточных лесостепных озер Зауралья и Ишимской равнины. Большая часть водоемов изучена впервые, для нескольких уточнены значения pH, минерализация и состав основных ионов. На основе полученных данных показана высокая вариабельность химического состава озерных вод в градиенте изменения физико-географических условий.

2. Впервые детально охарактеризованы процессы современного минералообразования в донных отложениях водоемов Зауралья и Ишимской равнины. Выявлены характерные особенности морфологии и состава минеральных образований в зависимости от химического состава вод, сезонной изменчивости и степени вовлеченности биоты в их формирование.

3. Впервые установлена биогенная природа высокомагнезиальных карбонатов в пределах лесостепной зоны Зауралья и Ишимской равнины.

Практическая значимость работы. Охарактеризован минеральный состав терригенной и аутигенной составляющих донных отложений малых бессточных водоемов лесостепной зоны Зауралья и Ишимской равнины, описана вариабельность химического состава вод по ряду геохимических параметров как между ключевыми участками, так и внутри каждой группы.

Выявлена связь процессов современного минералообразования высокомагнезиальных карбонатов и метаболизма живых организмов в пределах системы «вода – донные отложения» ряда изучаемых объектов.

Значительная часть работ проводилась при поддержке гранта РФФИ Аспиранты «Геохимические особенности вод и состава донных отложений лесостепных озер юго-запада Западной Сибири, как ключ к пониманию современных особенностей функционирования и развития водоемов семиаридной зоны» (№ 19-35-90004) и при поддержке мегагранта Правительства Тюменской области № 89-ДОН «TerrArctic» «Устойчивое землепользование в Арктике в свете глобальных природных изменений: естественные и антропогенные факторы стабильности».

Полученные в ходе исследования материалы могут использоваться как основа для дальнейшего определения роли малых бессточных водоемов в формировании континентальных биогеохимических циклов. Кроме того, результаты работы могут быть востребованы при организации мероприятий в сфере рационального природопользования, планирования сельскохозяйственной и водоохранной деятельности. Материалы диссертации будут использованы в учебных курсах по направлению «Литология и общая региональная геология» в Институте наук о Земле (ИНЗЕМ) ТюмГУ.

Объекты, предмет и методы исследований. Объектами исследования являются вода и донные отложения малых бессточных озер лесостепной зоны Зауралья и Ишимской равнины. Предметом являются химический состав вод, минеральный состав и формы проявления процессов современного минералообразования в донных отложениях озер и микробиолитах. Исследования проведены на 43 озерах с отбором проб озерных вод, верхней части колонки донных отложений. В водоемах с явно выраженными признаками активной биоминерализации отбирались также образцы береговых фаций и биоминеральные новообразования. Все озера разделены на 5 групп, расположенных по мере удаления с запада на восток от юго-восточной окраины Уральских гор (рисунок 1).

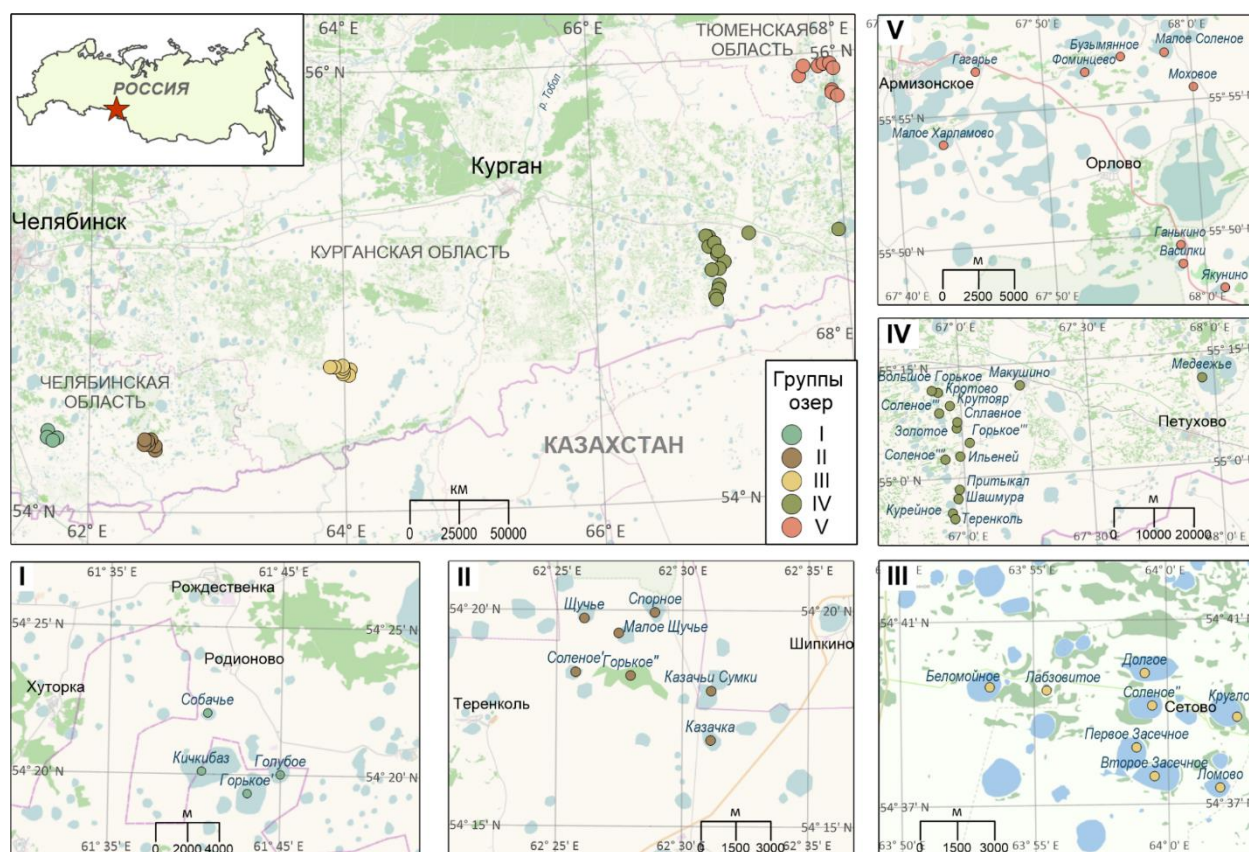


Рисунок 1 – Карта территории исследования и расположения исследованных водоемов

При проведении исследований вариабельности минерального состава донных отложений водоемов и геохимических особенностей вод использован сравнительно-географический метод. Использование метода ключевых участков при планировании полевых исследований позволило охарактеризовать геохимические и минералогические различия между конкретными группами водоемов по мере удаления от Урала на сопоставимых выборках. Пробоотбор компонентов лимноландшафтов проводился в летне-осенний и осенне-весенний полевые сезоны с 2017 по 2022 годы.

Район исследований является относительно однородным по геологическому строению и располагается в пределах Западно-Сибирской аккумулятивной равнины. Покровные отложения в пределах рассматриваемой территории представлены, главным образом, четвертичными субэральными и озерно-аллювиальными суглинками и значительно реже выходящими на поверхность песчано-глинистыми отложениями палеогена и неогена. Подземные воды региона преимущественно пресные и солоноватые. Миграция пластовой воды происходит с запада на восток с постепенным увеличением напора. При этом

описано увеличение минерализации подземных вод с увеличением глубины, от пресных и слабосоленых вод в первых метрах и до минерализации 42 г/дм³ в триасовых отложениях на глубине свыше 300 м. По элементному составу на глубинах до 5 метров воды преимущественно хлоридно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые, гидрокарбонатно-кальциевые-магниевые или магний-кальциевые, а с 8 до 80 м – гидрокарбонатно-магниевые-кальциевые. Территория исследований относится к подзоне северной лесостепи. Климат региона – умеренно континентальный со среднегодовой температурой 1,9-4,7 °С, среднее количество осадков в год – 381-671 мм. Для изучаемой территории характерно достаточное высокое увлажнение (коэффициент увлажнения порядка 1) со значительной флуктуацией осадков в течение года. Ландшафты северной лесостепи представлены чередующимися участками распаханых полей и березовых колков с преобладанием черноземов выщелоченных и солодей в микропонижениях.

При изучении водоемов, отборе, консервации и анализе проб озерных вод использовались подходы, принятые в гидрологических и гидрохимических исследованиях и аналитической химии: ионная хроматография (Dionex 2000i, Thermo Fisher Scientific), определение растворенного органического и неорганического углерода при помощи анализатора (TOC-Vscn, Shimadzu), определение ионного состава с использованием масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Анализ и интерпретация состава донных отложений базировались на методах и подходах, принятых в литологии и минералогии осадочных горных пород. Фазовый состав образцов определялся по дифрактограммам неориентированных образцов (рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD-6000). Микроскопические исследования включали: электронную микроскопию с элементным анализом (TM3000 (Hitachi) с анализатором SwiftED3000 (Oxford), JSM-6510LV-EDS, аналитический комплекс JEOL с рентгеновским энерго-дисперсионным спектрометром Oxford Instruments INCA Energy 350, JSM-6390LV (Jeol) с анализатором INCA Energy 450 X-Max80 EDS (Oxford)), оптическую микроскопию (Olympus-BX53MTRF), конфокальную лазерную сканирующую микроскопию (Zeiss LSM 780 NLO (Carl Zeiss)).

Для анализа данных использовали пакет программ STATISTICA 12 (StatSoft, США). Базовая описательная статистика включала среднее значение, медиану, минимум, максимум, стандартное отклонение (SD) и коэффициент вариации (CV) для всех гидрохимических параметров. Для оценки различий в гидрохимических свойствах пяти групп озер применялся однофакторный дисперсионный анализ Краскела-Уоллиса (ANOVA) по рангам и медианный критерий с последующим множественным сравнением средних рангов для всех групп. Визуализацию данных проводили с помощью программ Grapher 17 (Golden Software, США) и STATISTICA 12 (StatSoft, США). Термодинамическое моделирование, включающее расчет индексов насыщения водного раствора по отношению к различным карбонатам, производилось с помощью программы Visual MINTEQ ver. 3.1.

Личный вклад автора. Автором полностью спланирован и выполнен комплекс полевых исследований: отбор, консервация образцов вод; пробоподготовка образцов донных отложений и биоминеральных новообразований для аналитических исследований. Лично автором осуществлен полный комплекс исследований, включавших оптическую (изучение образцов в петрографических просвечивающих шлифах при использовании поляризационного микроскопа), электронную и лазерную микроскопию (изучение изображения регистрации отраженных рассеянных электронов напыленных золотом слабосцементированных микропрепаратов); выполнена статистическая обработка и интерпретация полученных результатов, подготовлен оригинальный графический материал.

Положения диссертации, выносимые на защиту.

Первое защищаемое положение. На территории лесостепной зоны Зауралья и Ишимской равнины преобладают водоемы с высокоминерализованными щелочными и

сильнощелочными хлоридными калиево-натриевыми водами. Варьирование содержаний основных макрокомпонентов в озерных водах как в пределах всей территории исследования, так и внутри отдельных групп, определяет различия в потенциале вторичного карбонатообразования.

Второе защищаемое положение. Донные отложения озер характеризуются разнообразием аутигенных минералов, включающих в себя следующие группы: галоиды, карбонаты, слоистые силикаты, сульфаты, а также гидроксиды, оксиды и сульфиды, что подчеркивает неоднородность геохимических параметров водоемов внутри групп.

Третье защищаемое положение. Проанализированы процессы формирования высокомагнезиальных карбонатов в малых бессточных высокоминерализованных озерах лесостепной зоны Зауралья и Ишимской равнины. Установлена роль альго-бактериальных сообществ в локализации процессов карбонатообразования.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 6 научных работ, из них 4 статьи в научных журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (в том числе 3 статьи в зарубежных научных изданиях, цитируемых БД Web of Science, 4 статьи в зарубежных научных изданиях, цитируемых БД Scopus); защищаемые положения были представлены и обсуждены на Международном научном симпозиуме имени академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск; 2019 г.) и конференции с международным участием «Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии» (Сыктывкар, 2022 г.).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы – 126 страниц, включая 26 рисунка и 4 таблицы. Список литературы насчитывает 211 наименований, в том числе 148 на иностранных языках.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю к.г.н., доценту, директору ИНЗЕМ ТюмГУ В.Ю. Хорошавину. Также автор глубоко признателен за консультации на ранних этапах планирования работ и организацию ряда аналитических исследований к.г.-м.н., PhD, директору по исследованиям GET CNRS О.С. Покровскому и заведующему лабораторией почвоведения НИИ ББ ТГУ А.Г. Лиму за анализ состава вод. Выражаю благодарность к.г.-м.н., с.н.с. лаборатории региональной геологии и геотектоники ИГГ УрО РАН Л.В. Леоновой за содействие в части микроскопических исследований и консультации по их интерпретации, к.г.-м.н., с.н.с. лаборатории минералогии ИГ КНЦ УрО РАН Ю.С. Симаковой за проведение анализов минерального состава донных отложений, к.б.н., с.н.с. О.С. Самылиной за обширную консультацию в части понимания механизма биогенных процессов, к.г.-м.н., доценту отделения геологии ТПУ М.А. Рудмину за помощь в проведении ряда исследований на базе университета, к.б.н., с.н.с. лаборатории биогеохимических и дистанционных методов мониторинга окружающей среды БИ ТГУ С.В. Лойко за предоставление возможности проведения ряда лабораторных исследований, м.н.с. Центра изотопной геохимии ТюмГУ А.О. Курасовой за помощь в определении гранулометрического состава донных отложений, инженеру-исследователю Центра «Биотест-нано» ТГУ С.Ю. Моргалёву за проведение конфокальной микроскопии, к.г.-м.н. н.с. НИЛ седиментологии и эволюции палеобиосферы ТюмГУ О.И. Дерягиной за помощь в обсуждении результатов, д.г.-м.н., г.н.с. ИКЗ ТюмНЦ СО РАН Е.А. Слагоде за помощь в обсуждении результатов. Особую благодарность автор выражает н.с. НИЛ седиментологии и эволюции палеобиосферы ТюмГУ А.О. Константинову за активную помощь и поддержку на всех этапах проведения работ, а также к.г.н., с.н.с. НИЛ мониторинга биосферы ЮФУ Е.Ю. Константиновой за консультацию на стадии обработки и обсуждения результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первое защищаемое положение

На территории лесостепной зоны Зауралья и Ишимской равнины преобладают водоемы с высокоминерализованными щелочными и сильнощелочными хлоридными калиево-натриевыми водами. Варьирование содержаний основных макрокомпонентов в озерных водах как в пределах всей территории исследования, так и внутри отдельных групп, определяет различия в потенциале вторичного карбонатообразования.

В результате определения основных физико-химических параметров вод показано, что среднее значение pH воды исследованных озер составляет 8,7. Наибольшая доля озер характеризуется щелочной реакцией. Только в 32,5 % изученных озер значения pH находились в пределах 6,5-8,5, что соответствует нейтральной и слабощелочной реакции, а в 16,3 % водоемов воды имеют сильнощелочные условия ($\text{pH} > 9,5$). В целом, внутригрупповая изменчивость кислотно-основных условий вод относительно слабая, не обнаружено статистически значимых различий между группами озер по медианному значению pH согласно критерию Краскела-Уолисса и медианному тесту (рисунок 2).

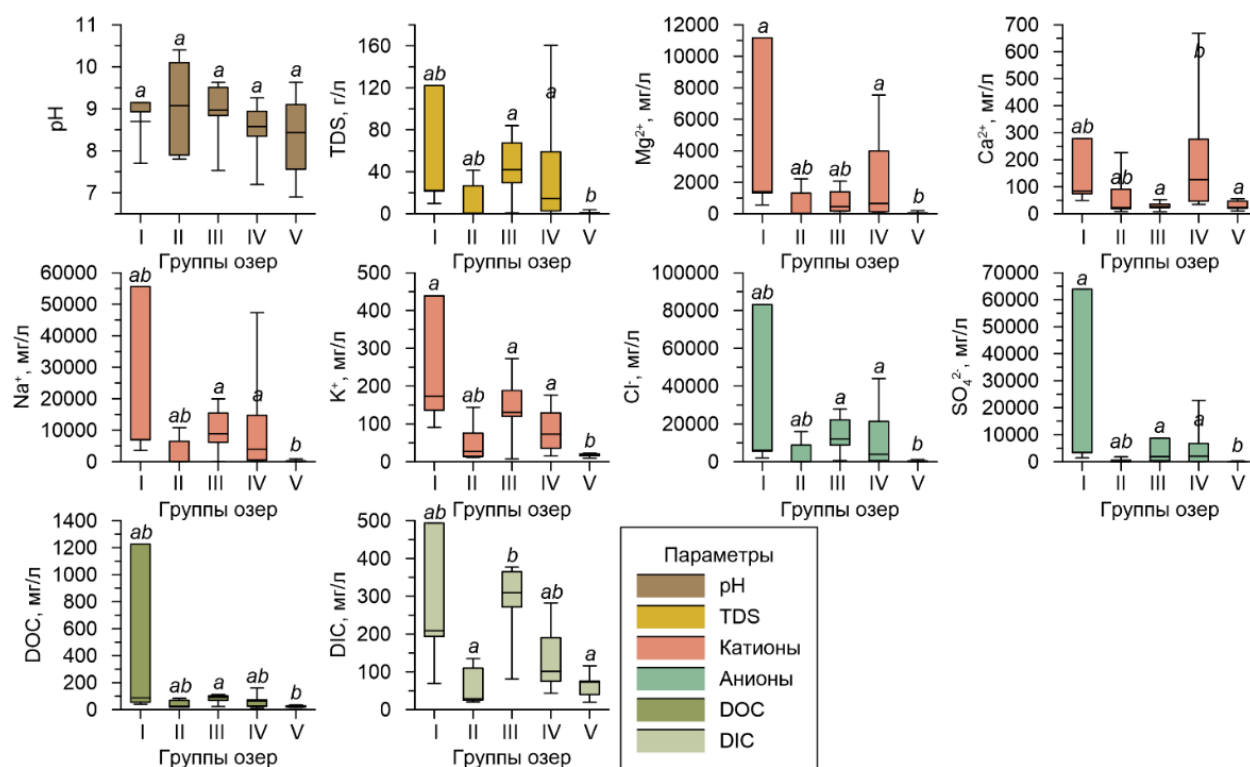


Рисунок 2 – Вариабельность гидрохимических свойств между группами исследуемых озер
Примечание: линии внутри прямоугольника отражают медианные значения, усы – минимумы и максимумы; разные буквы обозначают значительные различия параметров между группами

Среднее значение TDS в изучаемых водах составляет 26,9 г/л, что согласно классификации А.М. Овчинникова соответствует водам повышенной солености. Доля пресных водоемов составляет всего 32,6 %, а большинство имеет минерализацию от относительно повышенной до рассолов. Как показывают результаты анализа содержания растворенных солей в водах исследуемых озер, различия TDS внутри одной группы водоемов могут составлять более чем три порядка и подтверждаются статистически. Озера III группы характеризуются максимальными медианными значениями TDS (42 г/л),

соответствующими повышенной солености. Озера V группы, в целом, являются более пресными по сравнению с остальными группами (рисунок 2).

Растворенные компоненты в порядке убывания средней концентрации образуют ряды: $\text{Na} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Ca}$ и $\text{Cl} > \text{SO}_4 > \text{DIC} > \text{DOC}$. Отмечается значительная вариация содержания основных ионов в изученных водах. Существенные различия между средними и медианными содержаниями основных ионов внутри каждой группы озер и в целом во всей выборке подчеркивают неоднородность химизма вод. Согласно статистическому критерию Краскела-Уоллисса и медианному тесту существуют сильно значимые различия между содержаниями основных ионов, DOC и DIC ($p < 0.005$) в водах озер по группам (рисунок 2).

Классификация вод исследуемых озер по химическому составу проводилась на основе анализа гидрохимической диаграммы Пайпера (Piper, 1944), построенной по концентрациям доминирующих ионов в эквивалентной форме (рисунок 3). В катионном составе вод подавляющего большинства озер преобладал ион натрия. Только пробы вод оз. Казачка (II группа) и оз. Моховое (V группа) попали в зону смешанного состава. В анионном составе хлорид-ион преобладает в 70 % исследованных проб, гидрокарбонат-ион – в 23 % проб. В зону смешанного состава попали пробы вод оз. Беломойное (III группа), оз. Теренколь и оз. Кротово (IV группа).

Подавляющее большинство проб (76,7 %) спроецированы в зону гидрогеохимической фации II ($\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$), совпадающей с типом хлоридных калиево-натриевых соленых вод (рисунок 3). В зону гидрогеохимической фации III ($\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{HCO}_3^-$) попали пробы оз. Безыменного (V группа), воды которого характеризуются как гидрокарбонатные калиево-натриевые (4 тип), а также воды смешанного состава ряда озер II и V групп. В зону гидрогеохимической фации IV ($\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^-$), совпадающей с типом гидрокарбонатных кальциево-магниевых вод с временной жесткостью, спроецированы пробы оз. Казачка (II группа) и оз. Моховое (V группа). Стоит отметить, что озера II и V групп характеризуются наибольшей неоднородностью химического состава, который, по всей видимости, обусловлен локальными особенностями геологических условий, такими как выходы подземных вод разных горизонтов, или более близким к поверхности расположением обогащенных глинистым материалом отложений.

Обнаружены статистически значимые ($p < 0,05$) слабая и умеренная положительные корреляции ($0,36 < r < 0,52$) между площадью исследуемых озер с общим количеством растворенных частиц (общей минерализацией) и с концентрацией основных катионов и анионов (таблица 1). Также наблюдаются слабые положительные корреляции между площадью водосбора и содержанием основных ионов ($0,4 < r < 0,5$). В то же время, средняя глубина водоемов не является статистически значимым фактором, определяющим химизм вод ($r < 0,3$). Между температурой вод и остальными физико-химическими параметрами наблюдается слабая положительная взаимосвязь ($0,32 < r < 0,43$). Отмечена умеренная обратная зависимость между значениями pH и содержанием растворенного кальция в водах исследуемых озер ($r = -0,532$), что объясняется тем фактом, что растворенные ионы Ca^{2+} способны снижать содержание избыточного растворенного углекислого газа, понижая кислотность вод. Общее количество растворенных частиц наиболее тесно связано с содержаниями Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , DOC и характеризуется очень высокой силой связи ($r > 0,9$), и K^+ , связь с которым соответствует сильной корреляции ($r = 0,815$). Максимальное значение r отмечается между Na^+ и Cl^- (0,98).

Также с целью определения предрасположенности вод изученных озер к формированию высокомагнезиальных карбонатов рассчитано соотношение Mg/Ca , которое является важным фактором эндогенного минералообразования, определяющим возможность осаждения высокомагнезиальных карбонатов. Во всей выборке значения этого соотношения варьируются от 0,8 до 198,0. Регрессионный анализ показал, что между соотношением Mg/Ca

и значениями pH отсутствуют линейные связи, тогда как согласно коэффициенту детерминации отмечаются статистически значимые положительные связи умеренной силы с минерализацией и слабая связь с отношением DOC/DIC.

Тип вод по катионному составу:

- A Кальциевый
- B Магниевый
- C Натриевый
- D Смешанный

Тип вод по анионному составу

- E Гидрокарбонатный
- F Сульфатный
- G Хлоридный
- H Смешанный

Типы вод:

- 1 $\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}$ и $\text{HCO}_3^- \text{-CO}_3^{2-}$
(Временная жёсткость)
- 2 $\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}$ и $\text{Cl}^- \text{-SO}_4^{2-}$
(Постоянная жёсткость)
- 3 $\text{Na}^+ \text{-K}^+$ и $\text{Cl}^- \text{-SO}_4^{2-}$
(Солёные)
- 4 $\text{Na}^+ \text{-K}^+$ и $\text{HCO}_3^- \text{-CO}_3^{2-}$
(Карбонаты щелочных металлов)
- 5 Смешанный

Гидрохимические фации:

- I $\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-Cl}^- \text{-SO}_4^{2-}$
- II $\text{Na}^+ \text{-K}^+ \text{-Cl}^- \text{-SO}_4^{2-}$
- III $\text{Na}^+ \text{-K}^+ \text{-HCO}_3^-$
- IV $\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-$

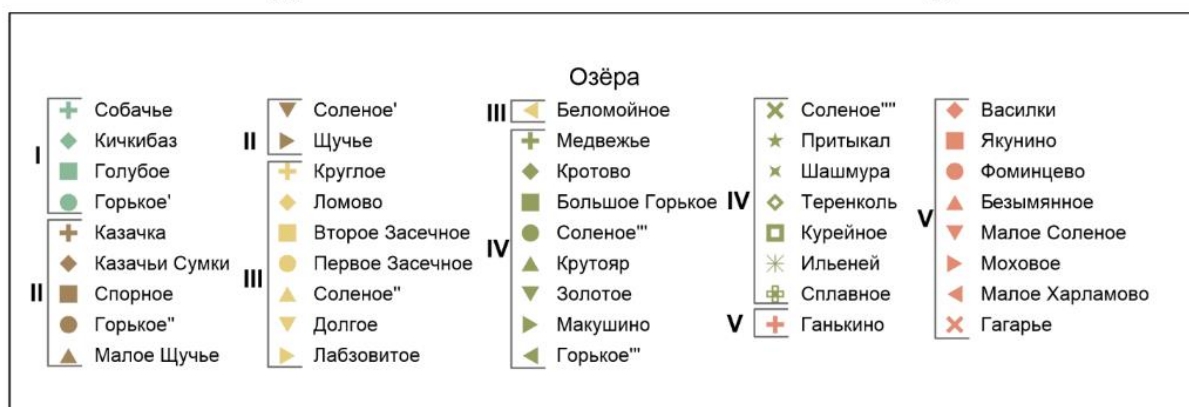
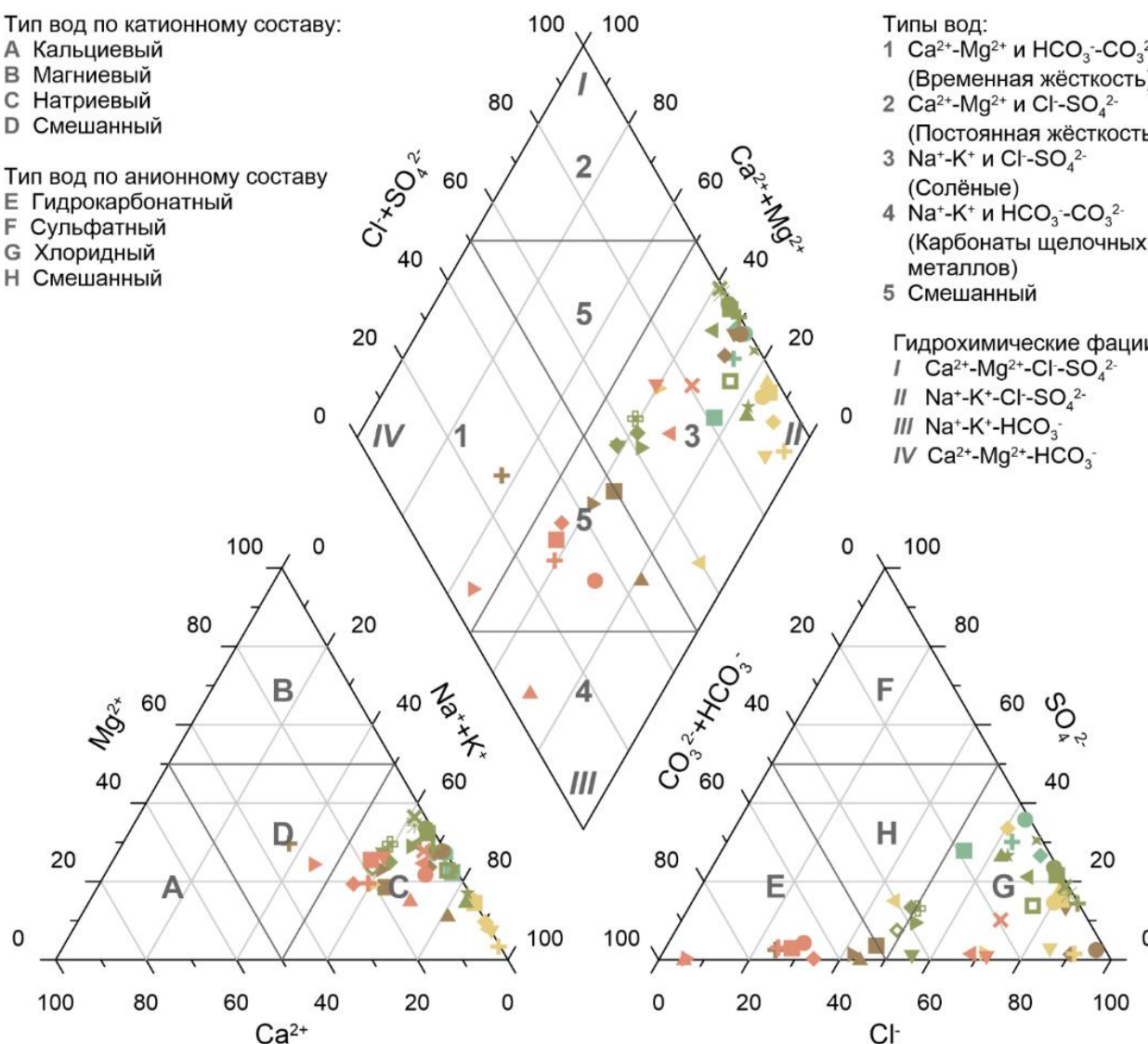


Рисунок 3 – Диаграмма Пайпера химического состава озёр

Примечание: римскими цифрами и цветом обозначены группы озёр

Таблица 1 – Коэффициенты корреляции Спирмена между морфологическими параметрами озер и физико-химическими свойствами вод (N=43)

	Площадь озер	Площадь водосбора	Средняя глубина	Температура воды	pH	TDS	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	DOC	DIC
Площадь	1,000													
Площадь водосбора	0,958*	1,000												
Средняя глубина	-0,078	-0,049	1,000											
Температура воды	0,101	0,017	-0,133	1,000										
pH	-0,057	0,091	0,106	0,043	1,000									
TDS	0,493*	-0,070	-0,264	0,433*	-0,142	1,000								
Mg ²⁺	0,524*	0,473*	-0,246	0,408*	-0,293	0,926*	1,000							
Ca ²⁺	0,413*	0,500*	-0,221	0,154	-0,532*	0,570*	0,758*	1,000						
Na ⁺	0,512*	0,366*	-0,259	0,423*	-0,191	0,966*	0,959*	0,610*	1,000					
K ⁺	0,462*	0,500*	-0,143	0,405*	0,053	0,815*	0,795*	0,444*	0,836*	1,000				
Cl ⁻	0,524*	0,475*	-0,297	0,423*	-0,220	0,969*	0,949*	0,619*	0,980*	0,816*	1,000			
SO ₄ ²⁻	0,489*	0,501*	-0,332*	0,323*	-0,182	0,925*	0,933*	0,609*	0,939*	0,773*	0,931*	1,000		
DOC	0,357*	0,476*	-0,106	0,371*	-0,037	0,902*	0,809*	0,402*	0,887*	0,857*	0,864*	0,794*	1,000	
DIC	0,260	0,400*	-0,007	0,137	0,072	0,654*	0,571*	0,154	0,666*	0,734*	0,639*	0,624*	0,754*	1,000

Примечание: * – r, значимые на уровне p < 0,05

Также наблюдается корреляция значений соотношения Mg/Ca с формированием Mg-Са-карбонатов. Так, с увеличением преобладания в водах ионов магния над ионами кальция в донных отложениях с большей вероятностью формируются высокомагнезиальные кальций-карбонаты (доломит, Mg-кальцит) или магниевые карбонаты (гидромагнезит).

Таким образом, морфометрические параметры озер слабо влияют на формирование химизма вод. На территории исследования преобладают щелочные и сильнощелочные водоемы с высокой минерализацией с хлоридными калиево-натриевыми водами. Вместе с тем содержания основных макрокомпонентов в озерных водах значительно варьируют как в пределах всей территории исследования, так и внутри отдельных групп озер. Этим определяются различия в потенциале вторичного карбонатообразования.

Второе защищаемое положение

Донные отложения озер характеризуются разнообразием аутигенных минералов, включающих в себя следующие группы: галоиды, карбонаты, слоистые силикаты, сульфаты, а также гидроксиды, оксиды и сульфиды, что подчеркивает неоднородность геохимических параметров водоемов внутри групп.

Озерные отложения представлены хемогенно-терригенным несцементированным осадком, преимущественно мелкозернистой песчаной фракции, иногда с примесью более мелких фракций. Осадки обогащены рассеянным органическим веществом, продуктами разложения растительных и животных остатков, главным образом, водорослей и бактерий.

По составу и минеральному соотношению терригенной компоненты осадка озера отличаются незначительно. Общей характеристикой минерального состава отложений всех изученных водоемов является явное преобладание терригенной фракции, представленной, главным образом, обломками кварца и полевых шпатов, в некоторых случаях с примесью терригенного слюдяного материала. Также, во всех образцах, кроме оз. Гагарье, содержание кварцевой компоненты преобладает над полевошпатовой. Кварцевые зерна часто имеют следы растворения, иногда с тонкими инициальными регенерационными поверхностями. Обломки полевых шпатов также несут следы растворения, некоторые зерна частично пелитизированы и зачастую замещены аутигенным глинистым материалом.

Стоит отметить, что не все минералы, обнаруженные в ходе исследования отложений при помощи сканирующей электронной микроскопии, возможно подтвердить рентгеноструктурным анализом, так как у метода есть определенный порог чувствительности, а некоторые аутигенные минералы имеют меньшую распространенность и небольшую локализацию.

Существенная неоднородность минерального состава донных отложений изученных водоемов обусловлена разнообразием процессов аутигенного минералообразования, отраженных в формировании парагенетических ассоциаций новообразованных минералов.

В отложениях озер I группы наиболее распространенными аутигенными минералами являются карбонаты, обнаруженные во всех изученных образцах донных отложений. Наиболее распространены карбонаты кальция, а именно – кальцит, в меньшей степени арагонит. При этом относительно высокие содержания арагонита по данным рентгеноструктурного анализа, вероятно, обусловлены микровключениями карбонатной биокластики. Явно аутигенные агрегаты арагонита, как правило, характеризуются относительно высоким содержанием магния. Реже встречаются

единичные микроагрегаты железистого и магниального кальцита, а также гидромагнезита. В оз. Кичкибаз обнаружены сферические микрокристаллы родохрозита (рисунок 4), а в оз. Кичкибаз и Горькое обнаружен водный сульфат натрия и магния $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (блётит), часто встречающийся в ассоциации с гипсом, образующим радиально-лучистые игольчатые микроагрегаты (рисунок 5 Е). Глинистые аутигенные минералы представлены слабо окристаллизованными пленками иллита, развивающегося по поверхностям терригенных зерен. Галит, формирующий сплошные массы, а также кубические агрегаты и скелетные кристаллы, обнаружен лишь в оз. Собачье и Кичкибаз. Также практически во всех водоемах данной группы обнаружены редкие сферические микроагрегаты фрамбоидального пирита.

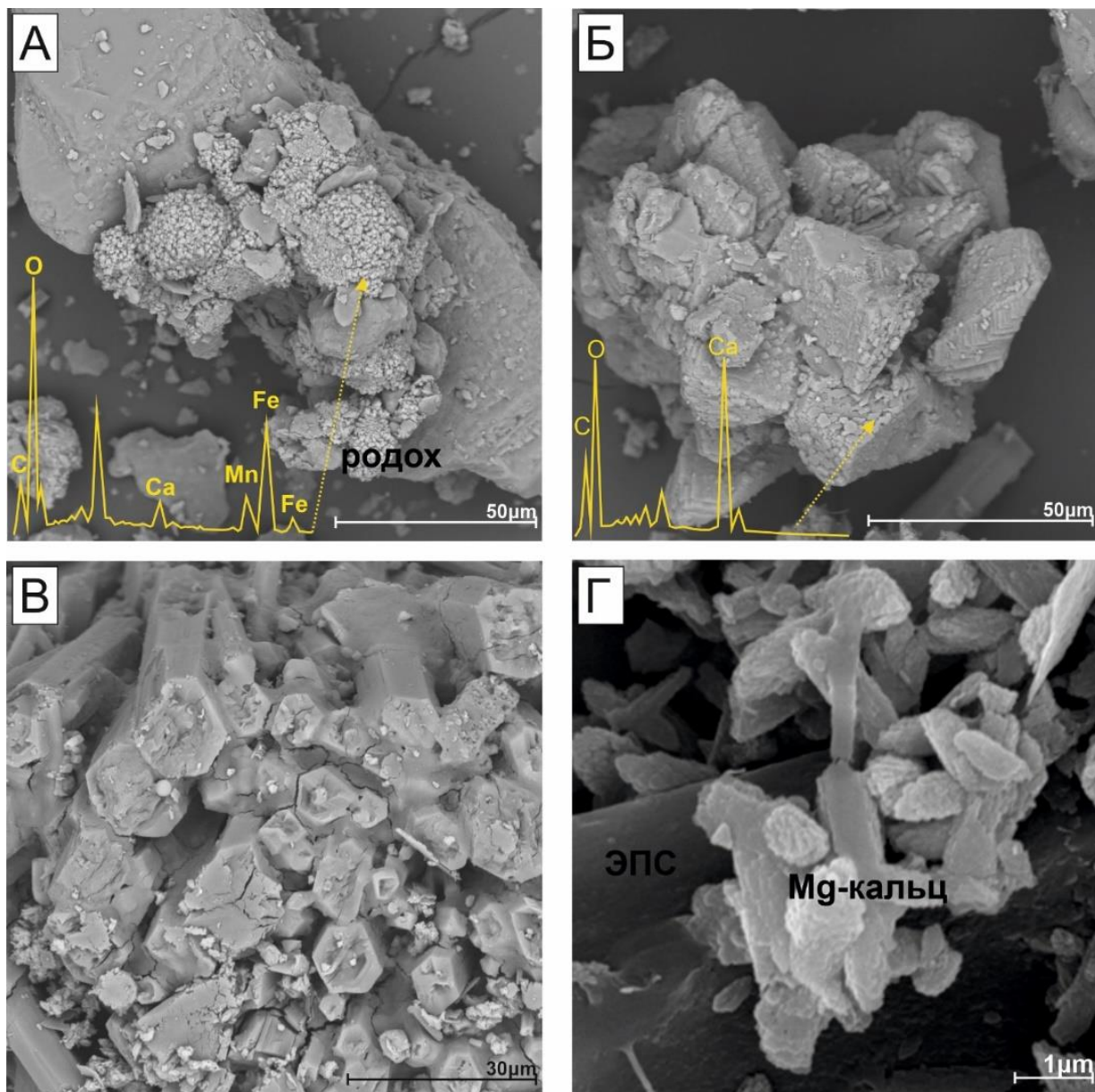


Рисунок 4 – СЭМ изображения (в отраженных рассеянных электронах) некоторых карбонатов, наблюдаемых в исследуемых донных отложениях
 А) сферические микроагрегаты высокожелезистого родохрозита на поверхности терригенного кварцевого зерна (оз. Кичкибаз); Б) сростки микрокристаллов аутигенного

кальцита (оз. Кичкибаз); В) сростки столбчатых микрокристаллов арагонита (оз. Голубое); Г) расщепленные сноповидные микрокристаллы

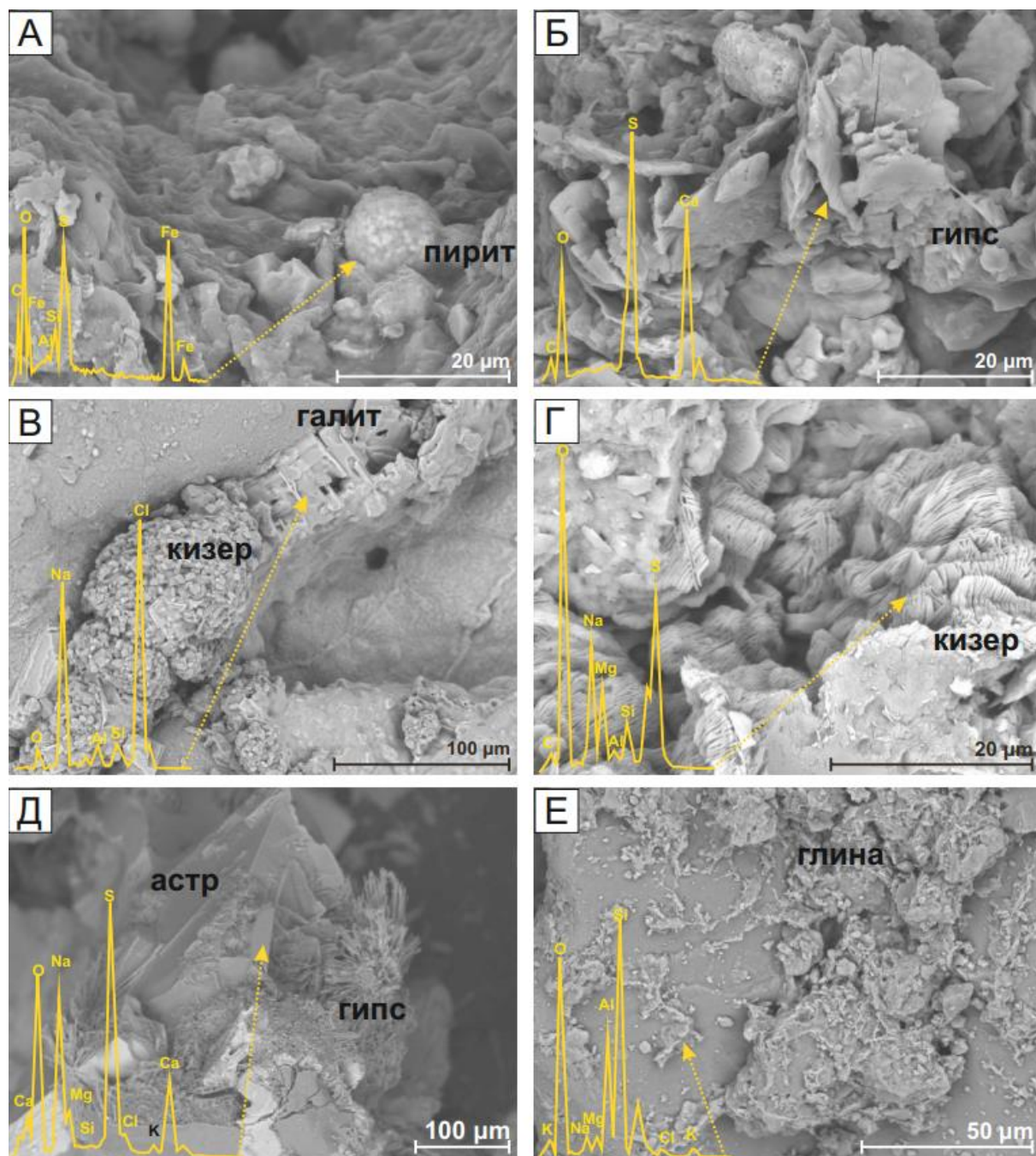


Рисунок 5 – СЭМ изображения (в отраженных рассеянных электронах) основных минералов, наблюдаемых в исследуемых донных отложениях

А) сферические стяжения фрамбоидального пирита (оз. Круглое); Б) агрегаты уплощенных хлопьевидных кристаллов гипса (оз. Фоминцево); В) ассоциация сферических микроагрегатов минерала группы кизерит-эпсомит и сростков кубических кристаллов галита (оз. Соленое); Г) микроагрегат минерала группы кизерит-эпсомит (оз. Соленое); Д) ассоциация радиальнолучистых агрегатов игольчатых микрокристаллов гипса и массивных стяжений астраханита (оз. Горькое); Е) тонкие прерывистые пленки аутигенных глинистых минералов на поверхности терригенного кварцевого зерна (оз. Сплавное). Обозначения: Кизер – кизерит; Астр – астраханит.

Для II группы водоемов характерны микрокристаллические глинисто-карбонатные микроагрегаты, состоящие, в первую очередь, из кальцита, магнезиального кальцита, реже – гидромагнезита, в ассоциации с глинистым материалом. Иногда на поверхности глинисто-карбонатных микроагрегатов наблюдаются мелкие игольчатые агрегаты гипса и сплошные плёнки, реже – мелкие кубические образования кристаллов галита со следами растворения. Сульфиды представлены довольно крупными несферическими изометричными стяжениями фрамбоидального пирита, образующегося по биопленкам, скелетам диатомовых водорослей и спикулам губок. Интенсивность минералообразования в озерах данной группы не равномерна. Озера Горькое и Соленое, где наблюдается активное зарастание прибрежных участков дна, явно выделяются, высоким, относительно остальных озер группы, содержанием глинистых минералов в донных отложениях.

Донные осадки III группы озер характеризуются значительным количеством новообразованных высокомагнезиальных и Mg-Ca карбонатов, которые отличаются четко выраженной локализацией. В валовых пробах преобладают гипс, арагонит, иллит и гидромагнезит, тогда как в пределах мелководья и береговой зоны аутигенные минералы представлены, главным образом, гидромагнезитом, высокомагнезиальным кальцитом и доломитом, тяготеющим к микробиальным новообразованиям. В отложениях оз. Соленое обнаружен минерал кизерит $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, формирующий сплошные массивные агрегаты, часто в смеси с алюмосиликатами (рисунок 5 В, Г). Следует отметить, что кизерит более характерен для ископаемых месторождений солей, а его формирование в современных условиях описано крайне редко. Как и в большинстве озер в водоемах данной группы наблюдаются шестоватые игольчатые кристаллы гипса, часто в ассоциации со сплошными массами галита, а также в зонах, приуроченных к деградирующему органическому веществу, наблюдается формирование фрамбоидального пирита (рисунок 5 А).

Для отложений озер IV группы характерно преобладание карбонатов, при этом наиболее распространенным из них является кальцит. Например, в оз. Шамшура его содержание достигает 24,2 % от общей массы минеральной компоненты донного осадка. Часто кальцит формирует основу пелитоморфных глинисто-карбонатных стяжений, в состав которых входят Mg-кальцит, реже – железистый кальцит, и глинистые минералы. В отдельных случаях наблюдаются единичные агрегаты сноповидных микрокристаллов Mg-кальцита, развивающихся по органическим пленкам (рисунок 5 Г). Сидерит в виде уплощенных кристаллов и стяжений обнаруживается в донных отложениях оз. Медвежье и Курейное. Изометричные микрокристаллы анкерита $\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn})(\text{CO}_3)_2$ встречаются в осадках оз. Макушино и Теренколь и представлены в виде мелкокристаллических примесей единичных глинисто-карбонатных агрегатов. Также в ряде водоемов зафиксированы сростки пластинчатых кристаллов гипса, кубические кристаллы галита и агрегаты фрамбоидального пирита.

Донные отложения V группы озер характеризуются преобладанием карбонатов, в первую очередь кальцита, в меньшей степени железистого кальцита и магнезиального кальцита. Карбонаты формируют неплотные глинистые микроагрегаты, преимущественно в смеси с иллитом. Стоит отметить, что характерной особенностью донных отложений рассматриваемых озер является большое количество железа в составе глинистых и глинисто-карбонатных агрегатов. Также распространенным карбонатом в пробах данного ключевого участка является арагонит, однако его высокие содержания в отдельных случаях (до 5,8 % в оз. Гагарье), вероятно, обусловлены обилием фаунистических обломков раковин, в основном, брюхоногих моллюсков. В донных отложениях большинства озер V группы формируются мелкокристаллические,

сложенные уплощенными листоватыми микрокристаллами, агрегаты гипса, часто образующего ассоциации с сидеритом (рисунок 5 Б). Отличительной особенностью данной группы является распространенность гетита, который представлен округлыми глобулярными агрегатами.

Таким образом, среди аутигенных минералов наиболее распространены минералы класса галоидов, карбонатов, слоистых силикатов, сульфатов, также встречаются минералы групп гидроксидов, оксидов и сульфидов.

Различия в составе ассоциаций аутигенных минералов наблюдаются не только между ключевыми участками, но и внутри каждой группы. Однако можно выделить некоторые особенности состава донных отложений, присущие той или иной группе озер. Озера III группы характеризуются наибольшим разнообразием минералов магния, в особенности карбонатов, имеющих многочисленные признаки биогенного и биогенно-хемогенного происхождения. Донные отложения водоемов V группы отличаются присутствием оксидов железа, характеризующих, по всей видимости, локальные особенности литогенной основы и характера землепользования.

Основная причина существующих различий в составе аутигенной компоненты минерального состава донных осадков объясняется рядом факторов, таких как степень эвтрофикации, динамичность среды, интенсивность эрозионных процессов на водосборах, а также близость к эксплуатируемым участкам пахотных земель. Помимо этого, часть аутигенных минералов представляют собой сезонные новообразования, которые формируются в определенные периоды, связанные с внутригодовыми изменениями в интенсивности процессов испарения, активности метаболизма аквальной биоты и, возможно, зимним промерзанием.

Третье защищаемое положение

Проанализированы процессы формирования высокомагнезиальных карбонатов в малых бессточных высокоминерализованных озерах лесостепной зоны Зауралья и Ишимской равнины. Установлена роль альго-бактериальных сообществ в локализации процессов карбонатообразования.

Проявления биогенной минерализации обнаружены в большинстве осадков исследуемых водоемов (рисунок 6). Наибольшей активностью процессов биоминерализации характеризуются озера III группы, где максимальная интенсивность минералообразования локализована в пределах биомассы фототрофных организмов.

Основными минералами, обнаруженными в биогенных новообразованиях озер, являются гидромагнезит, магнезиальный кальцит (Mg-кальцит) и доломит. Формирование подобных минералов, в частности гидромагнезита, в современных континентальных условиях является важным с точки зрения понимания геохимической эволюции биосферы. Известно, что абиотическое осаждение доломита и магнезита при нормальном давлении и относительно низких, близких к комнатной, температурах ограничено кинетически в связи с сильно выраженными гидрофильными свойствами иона Mg^{2+} . В то же время в условиях современных континентальных водоемов и лагун относительно редко образуются гидратированные метастабильные фазы, такие как несквегонит, дюпингит и гидромагнезит ($Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 4H_2O$).

В результате мониторинга озер III группы на протяжении 2017-2022 года установлено, что наиболее активные процессы формирования карбонатов происходят в период интенсивного развития аквальной биоты (альго-бактериальных сообществ) в приповерхностных зонах водоемов.

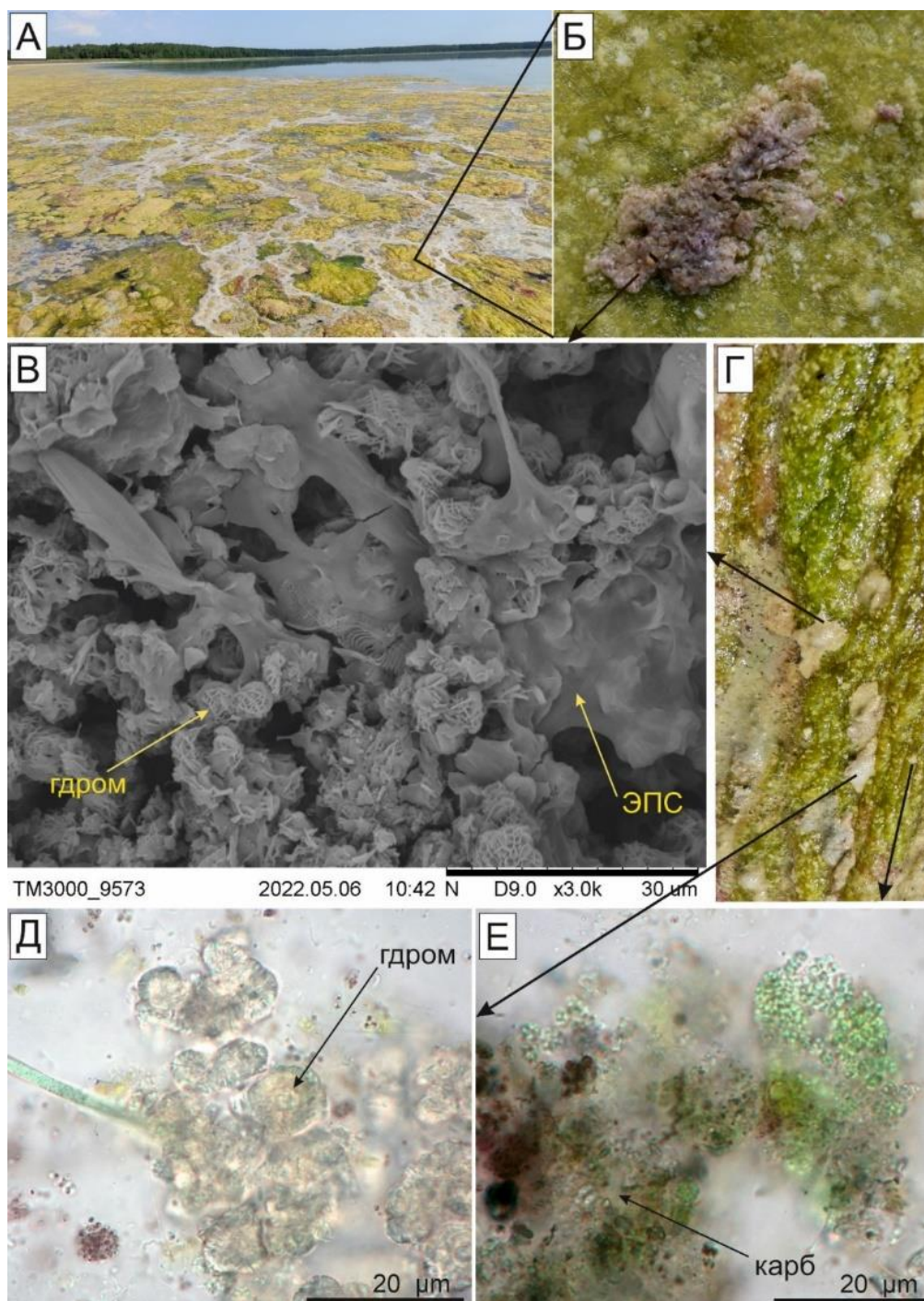


Рисунок 6 – Признаки бактериального генезиса современных карбонатных новообразований

А, Б, Г) снимки частично минерализованных бактериальных колоний в момент пика их активности на водоемах III группы; В) СЭМ изображение в отраженных электронах образования гидромагнетитовых микроагрегатов по ЭПС-пленкам бактериальной колонии; Д, Е) фото карбонатных сферических микроагрегатов, образующихся по живым бактериальным скоплениям, снятые в микробиологическом препарате с использованием бинокулярного микроскопа. Обозначения: гдром – гидромагнетит, карб – неуставленный карбонат, ЭПС – экзополисахаридные пленки

В процессе своего метаболизма микроорганизмы вырабатывают биогенные пленки, состоящие из экзополисахаридов (ЭПС). Такие пленки, являясь высокомолекулярными полимерами, секретируются в окружающую среду, что позволяет им выступать в качестве идеального субстрата для роста микрокристаллов. Помимо этого, микроорганизмы способны накапливать ионы в результате процессов хелатации, повышая тем самым их концентрацию в пределах своих оболочек. После отмирания или в процессе метаболизма биомассы эта особенность увеличивает вероятность формирования солей ряда элементов. Также известны исследования, указывающие на возможность влияний бактериальных колоний на химизм окружающей среды, в первую очередь, за счет локального изменения значений водородного показателя. Дополнительно стоит отметить тот факт, что по своему определению ЭПС-пленки формируют разницу сред с окружающей водой, что способствует образованию геохимического микробарьера.

Первым этапом биогенного образования карбонатов в рассматриваемых озерах является формирование минеральных микроагрегатов на поверхности водорослевых матов в момент цветения. Данные новообразования представляют собой мягкие биокарбонатные шляпки (рисунок 6, А-Г), формирующиеся на участках, где водорослевые нити обильно покрыты бактериальными колониями, вследствие чего наблюдается более интенсивное выделение ЭПС-пленок. Одновременно с этим во всем объеме водорослевой биомассы формируется огромное количество хлопьевидных микроагрегатов гидромагнетита. Подобные микростяжения характеризуются относительно невысокой устойчивостью и часто растворяются еще в живой биомассе. В то же время значительная часть подобных карбонатных агрегатов остается после деградации большей части биоты и оседает на дно водоема в виде тонкодисперсного прослоя, частично растворяющегося в осенне-весенний период. Со временем данное образование уплотняется, иногда формируя тонкие прослой. По мере деградации биомассы альго-бактериальных матов и постепенного испарения воды в жаркий период (июль-август) в водоемах образуются массивные альго-карбонатные биоминеральные новообразования в виде сплошных корок толщиной до 1 см, накапливающихся в прибрежной зоне. Водорослевые нити (талломы) в таких образованиях покрываются плотным гидромагнетитовым панцирем. В ходе проведенных исследований обнаружены как отмершие талломы, покрытые карбонатной коркой с частичной минерализацией биомассы, так и живые, покрывающиеся более тонким, иногда прерывистым, слоем аутигенного минерала (рисунок 7 А-В).

Бактериальные колонии, наряду с водорослями, играют важную роль в формировании карбонатных новообразований в рассматриваемых аквальных системах (рисунок 6, Е). Роль бактериальных сообществ в развитии аутигенных карбонатов наиболее четко проявляется при формировании микробиолитов в прибрежных фациях. Данные образования отличаются примесью терригенного материала, сцементированного матриком из частично минерализованных биопленок. Таким образом, популяции водорослей являются по сути ядром консорциума, а бактериальные сообщества – консортами.

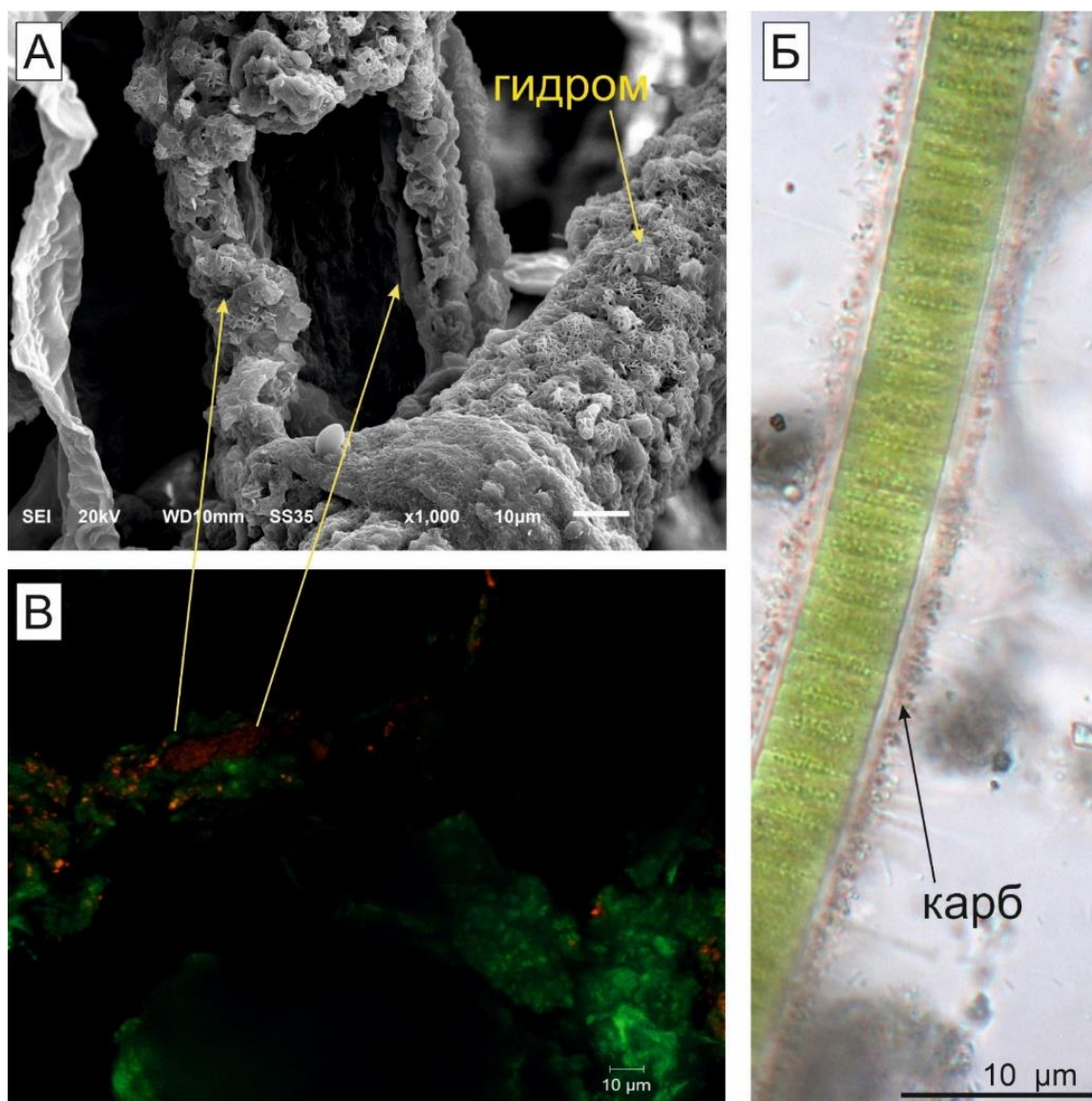


Рисунок 7 – Формирование минерального панциря на поверхности тела водорослей
 А) СЭМ изображение в отраженных электронах гидромагнезитовой корки на поверхности водорослевой нити; Б) снимок инициального минерального покрова, образующегося по ЭПС-пленке на чехле живой цианобактерии; В) снимок конфокальной микроскопии, детализирующий степень минерализации органического вещества.

Основным минералом биоминеральных агрегатов является гидромагнезит, формирующий сферические (звездчатые, розовидные) микроагрегаты, образующие карбонатные стяжения в матрице биогенных пленок. Также наблюдаются расщепленные сноповидные микрокристаллы Mg-кальцита, формирующие сферические, либо массивные стяжения, характерные для образований бактериальных колоний (микробиолитов) прибрежных фаций рассматриваемых водоемов. Реже обнаруживаются микрокристаллы доломита, часто приуроченные к скоплениям магнезиального кальцита и также тяготеющие к биоминеральным формам бактериального происхождения (рисунок 8).

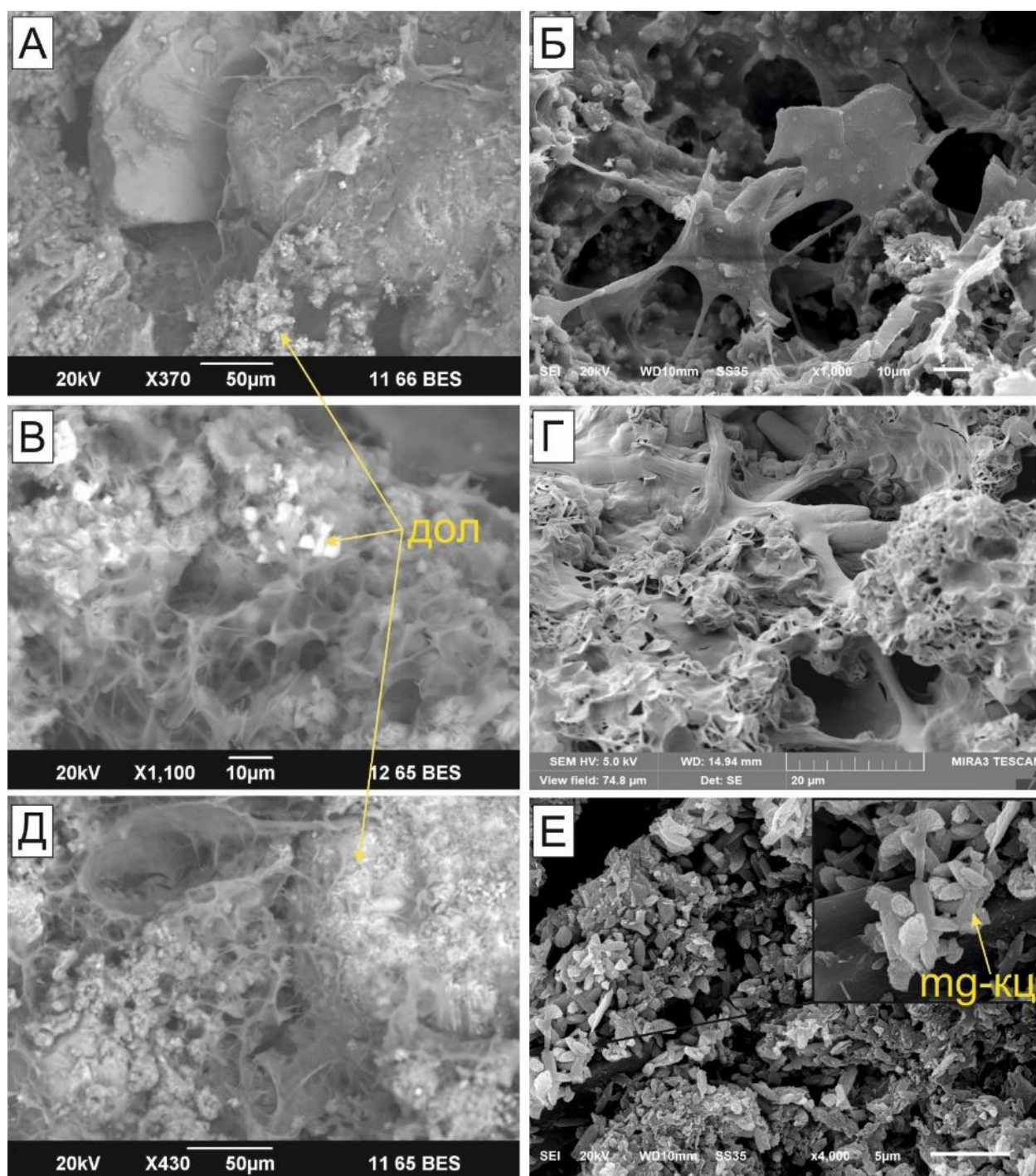


Рисунок 8 – СЭМ изображения (в отраженных рассеянных электронах) высокомагнезиальных карбонатов, образование которых приурочено к ЭПС-пленкам
Примечание: дол – доломит, Mg-кальцит – высокомагнезиальный кальцит

Таким образом, локализация формирования высокомагнезиальных карбонатов в отложениях озер III группы приурочена к биомассе фототрофных организмов. Исходя из полученных данных и опираясь на имеющийся опыт изучения подобных образований, можно предположить, что основная роль водорослей и бактерий при формировании высокомагнезиальных карбонатов сводится к выделению в процессе жизни экзополисахаридов, являющихся субстратом для кристаллизации минералов. Кроме того, альго-бактериальные сообщества в процессе метаболизма создают локальные

геохимические условия среды, такие как повышенная щелочная реакция среды, а также смещение карбонатного равновесия в ходе процессов фотосинтеза с поглощением в активной фазе фототрофами CO_2 из воды. Также дополнительным фактором, способствующим роли микроорганизмов в образовании Mg-карбонатов, может являться их способность захватывать и накапливать в себе катионы Ca^{2+} и Mg^{2+} , которые после деградации сообщества могут стимулировать образование карбонат-ионов.

Все вышеперечисленное не исключает возможности образования высокомагнезиальных карбонатов исключительно хемогенным или преимущественно хемогенным путем. Как показал анализ индексов насыщенности вод по отношению к ряду карбонатов, в том числе и магний-карбонатов, имеются предпосылки для их выпадения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучен химический состав вод, минеральный состав и проявления современного минералообразования в донных отложениях малых бессточных озер лесостепной зоны Зауралья и Ишимской равнины.

По результатам гидрохимических исследований установлено, что озера имеют преимущественно хлоридный калиево-натриевый соленый тип вод. По катионному составу большинство озер относится к натриевому типу, а по анионному – наблюдается значительная вариация состава вод среди водоемов ключевых участков II и V, относящихся как к гидрокарбонатному, так и к хлоридному типу. В остальных группах преобладает хлоридный тип вод. Определена доля пресных и соленых водоемов в выборке (32,6 % и 67,4 %, соответственно). Охарактеризована неоднородность значений общей минерализации, коэффициент вариации которой по общей выборке составляет 137,6 %, а минимальное его значение отмечается в III группе озер – 69,7 %, что свидетельствует о значительной вариабельности данного параметра. Установлено наличие слабой линейной зависимости величин TDS и содержания основных ионов в водах от площади озер. Выявлена сильная положительная корреляция между общей минерализацией вод и содержанием основных ионов от содержания в водах растворенных ионов Na^+ и Cl^- , за исключением иона Ca^{2+} , концентрация которого имеет слабую обратную линейную зависимость от значения кислотно-щелочного баланса. Также проанализированы молярные соотношения Mg/Ca и $(\text{Na}+\text{K})/(\text{Ca}+\text{Mg})$, по значениям которых выделяются озера III группы, где зафиксированы интенсивные процессы современного биохемогенного осаждения высокомагнезиальных карбонатов.

Показано, что в осадках всех исследованных водоемов наиболее значима терригенная фракция, в среднем составляющая более 80 % от общего объема с повсеместным преобладанием кварцевых зерен над полевошпатовыми. Также в большинстве водоемов выявлены активные процессы современного минералообразования. Среди аутигенных минералов наиболее распространены минералы следующих классов: галогены, карбонаты, слоистые силикаты, сульфаты, оксиды, гидроксиды и сульфиды. При этом, как между ключевыми участками, так и внутри групп озер, наблюдается значительная неоднородность в интенсивности процессов аутигенного минералообразования, а также разнообразии представленных в донных отложениях аутигенных минералов. Эти различия определяются рядом факторов, таких как степень эвтрофикации водоемов, уровень активности альго-бактериальных сообществ в водах, тип землепользования прилегающих территорий, а также характер гидродинамических условий конкретных водоемов.

В ряде водоемов III группы, располагающихся в пределах юго-запада Курганской области, обнаружены ярко выраженные процессы современного формирования

высокомагнезиальных карбонатов. В составе донных отложений этих озер, среди прочих, обнаружены такие минералы как гидромагнетит и доломит. При изучении образцов донных отложений и прибрежных фаций выявлена исключительная локализация формирования этих карбонатов в пределах областей развития пленок экзополисахаридов, вырабатываемых фототрофными организмами водоемов. Также в акватории ряда озер III группы обнаружены биоминеральные агрегаты различной размерности (микробиолиты), формирующиеся в прибрежных фациях. В качестве гипотезы выдвинута седиментологическая модель биогенно-обусловленного образования высокомагнезиальных карбонатов в озерах третьей группы. Предполагается, что уникальная для региона ассоциация минералов формируется благодаря созданию различными фототрофами локальных условий, способствующих данному процессу. Изменение кислотно-щелочного баланса вод и смещение карбонатного равновесия за счет биогенных процессов, а также способность биоты способствовать образованию полимерного субстрата для кристаллизации минералов, позволяет высокомагнезиальным карбонатам формироваться в охарактеризованных аквальных обстановках.

Результаты данной работы содержат качественно новую информацию об интенсивности и локализации процессов современного минералообразования в малых бессточных водоемах семиаридной зоны юго-запада Западной Сибири, а также описывают возможные механизмы формирования высокомагнезиальных карбонатов, являющихся достаточно редкими и относительно слабо описанными минералами в условиях современных гипергенных континентальных обстановок.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, индексируемых в международных наукометрических базах данных Scopus и (или) Web of Science, а также в научных изданиях, рекомендованных перечнем ВАК для публикации основных научных результатов диссертации:

1. **Novoselov A.A.** Mg-Rich authigenic carbonates in coastal facies of the Vtoroe Zasechnoe Lake (Southwest Siberia): First assessment and possible mechanisms of formation / A.A. Novoselov, A.O. Konstantinov, A.G. Lim, K.E. Goetschl, S.V. Loiko, V. Mavromatis, O.S. Pokrovsky // Minerals. – 2019. – Vol. 9. – Article number 763. – DOI:10.3390/min9120763 (*Web of Science*)

2. **Novoselov A.** Micromorphological and mineralogical features of saline playa surface sediments from two large Trans-Uralian lakes / A. Novoselov, A. Konstantinov, E. Konstantinova, T. Dudnikova, A. Barbashev, I. Lobzenko // Eurasian Journal of Soil Science. – 2022. – Vol. 11, № 2. – P. 93-101. – DOI: 10.18393/ejss.1011995 (*Scopus*)

3. **Новоселов А.** Карбонатные коры на фасадах зданий и сооружений города Тюмени: разнообразие и факторы формирования / А. Новоселов, А. Константинов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330, № 3. – С. 40-49. – DOI: 10.18799/24131830/2019/3/163 (*Web of Science*)

4. **Novoselov A.** Carbonate neoformations on modern buildings and engineering structures in Tyumen City, Russia: Structural features and development factors / A. Novoselov, A. Konstantinov, L. Leonova, B. Soktoev, S. Morgalev // Geosciences. – 2019. – Vol. 9. – Article number 128. – DOI:10.3390/geosciences9030128 (*Web of Science*)

Публикации в прочих научных изданиях:

5. **Новоселов А.А.** Формирование высокомагнезиальных карбонатов в мелководных озерах юго-западной части Западной Сибири / А.А. Новоселов // Труды XXIII Международного симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых

учёных: в 2 томах. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2019. – Т. 1. – С. 614-615.

6. Новоселов А.А. Биогенная природа высокомагнезиальных карбонатов донных отложений бессточных озер юга Западной Сибири / А.А. Новоселов, А.О. Константинов // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения-2022): Материалы российской конференции с международным участием. – Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2022. – С. 112.