

На правах рукописи



Мальцев Антон Евгеньевич

**ГЕОХИМИЯ ГОЛОЦЕНОВЫХ РАЗРЕЗОВ САПРОПЕЛЕЙ
МАЛЫХ ОЗЕР ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ И ВОСТОЧНОГО
ПРИБАЙКАЛЬЯ**

Специальность 25.00.09 — Геохимия, геохимические методы
поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск — 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель:

Леонова Галина Александровна, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии благородных и редких элементов и экогеохимии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН

Официальные оппоненты:

Савенко Виталий Савельевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Географического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, (г. Москва)

Погодаева Татьяна Владимировна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидрохимии и химии атмосферы Федерального государственного бюджетного учреждения науки Лимнологического института СО РАН, (г. Иркутск)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (г. Москва)

Защита диссертации состоится 20 декабря 2017 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 003.059.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН по адресу: 664033, Иркутск, ул. Фаворского 1а, факс: 8 (3952) 42-70-50; e-mail: korol@igc.irk.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте <http://www.igc.irk.ru> Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

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

 Королева Г.П.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Комплексные геохимические исследования непрерывных кернов донных осадков, полученных в результате бурения дна озер до подстилающих пород, позволяют выделить однородные интервалы и границы изменения условий седиментации за весь период голоцена, ассоциации химических элементов и основные закономерности их дифференциации в толще осадков на стадии раннего диагенеза. Наиболее перспективными объектами для подобных исследований во всем мире признаны малые озера, отложения которых накапливались в течение голоцена. В исследуемых регионах умеренного климата и увлажнения (юг Западной Сибири и Восточное Прибайкалье) были выбраны озера с органогенным типом осадконакопления. Для таких озер характерны высокие скорости накопления осадков, органогенные отложения (сапропели) хорошо отражают биогеохимические процессы, содержат много палеонтологического материала для целей биостратификации и хорошо датируются радиоуглеродным методом.

Накопление сапропелевых отложений является характерной чертой малых озер умеренных широт [Курзо и др., 2012; Топачевский, 2011 и др.], в том числе юга Западной Сибири, где физико-географические условия благоприятны для сапропелеобразования [Курортные ресурсы..., 1982]. Гористый рельеф Прибайкалья обуславливает преимущественное минеральное осадконакопление в озерах, а условия для накопления органических осадков существуют, в частности, в озерах конечноморенных возвышенностей, образованных плейстоценовыми ледниками на юго-восточном побережье Байкала [Кривоногов, 2010].

Существует не так много обобщающих работ по исследованию полных голоценовых разрезов донных осадков малых озер, и в частности, работа А.В. Масленниковой с соавторами, посвященная палеоэкологии и геохимии озерной седиментации голоцена Урала [Масленникова и др., 2014]. Известны работы В.Н. Меленевского с соавторами по трансформации органического вещества в стратифицированных голоценовых разрезах сапропелевых отложений малых озер юга Западной Сибири и Прибайкалья [Меленевский и др., 2011, 2015]. Большое количество работ посвящено палеореконструкциям по донным отложениям малых озер Южной Сибири [Безрукова и др., 2008, 2011; Shichi et al., 2009; Tarasov et al., 2009; Krivonogov et al., 2012; Kostrova et al., 2012; Fedotov et al., 2012; Muller et al., 2014 и др.]. Однако, большинство работ по геохимии донных осадков малых озер выполнены по неполным разрезам (кернами длиной до 100 см) [Даувальтер, 1998, 2012; Страховенко, 2011, 2014, 2016; Титова, Кокрятская, 2014; Манасыпов, 2013; Восель, 2015; Восель и др., 2015; Manasyrov et al., 2015 и др.]. Такие исследования дают представление о минеральном и элементном составе осадков, геохимии отдельных элементов и формах их нахождения, загрязнении озерных отложений тяжелыми металлами и техногенными радионуклидами, но не позволяют в полной мере судить об условиях осадконакопления за весь исторический период, источниках и генезисе органического вещества (ОВ), процессах его преобразования в диагенезе.

Актуальность диссертационной работы определяется необходимостью детального изучения геохимии и особенностей диагенетического преобразования богатых органикой сапропелевых отложений малых озер юга Западной Сибири и Прибайкалья. Значимость и необходимость работы обусловлена недостаточной изученностью источников поставки автохтонного и аллохтонного органического вещества в озерные осадки, биостратификации полных разрезов сапропелевых отложений, дающей представление о генезисе захороненного (фоссилизированного) ОВ, интенсивности микробной деструкции и трансформации ОВ, метаморфизации поровых вод на стадии раннего диагенеза. Это ставит проблему геохимических и биогеохимических исследований озерных сапропелей в ряд чрезвычайно актуальных как в теоретическом, так и практическом аспектах.

Объектом исследования являются малые озера юга Западной Сибири (Минзелинское, Большие Тороки, Иткуль) и Восточного Прибайкалья (Духовое, Котокель, Очки). **Предметом исследования** — керны донных отложений с ненарушенной стратификацией, полученные в результате бурения дна озер до подстилающих пород: Иткуль (1,8 м), Большие Тороки (1,8 м), Минзелинское (5 м), Очки (4,5 м), Духовое (7 м), Котокель (14 м), озерные и поровые воды, продуценты органического вещества.

Цель работы — установить закономерности постседиментационного преобразования органического и минерального вещества сапропелевых отложений исследуемых озер на основе комплексного геохимического исследования полных голоценовых разрезов с ненарушенной стратификацией.

Задачи исследования:

1. Определить источники поступления и генезис захороненного органического вещества;
2. Изучить трансформацию органической компоненты осадка при участии микроорганизмов;
3. Исследовать элементный и минеральный составы сапропелей;
4. Изучить особенности трансформации химического состава поровых вод в результате процессов микробной сульфатредукции;
5. Установить особенности формирования аутигенных минералов и выявить формы нахождения Fe и S.

Научная новизна. Впервые для типовых малых озер юга Западной Сибири и Прибайкалья детально изучена геохимия полных голоценовых разрезов сапропелей с ненарушенной стратификацией.

Впервые установлены источники поступления и генезис современного и захороненного органического вещества сапропелей по данным биологического анализа (биостратификации).

Установлено, что в типовых макрофитных озерах (по классификации Покровской А.А.) юга Западной Сибири формируются карбонатные органо-минеральные сапропели, а в типовых фитопланктонных озерах Прибайкалья — бескарбонатные органо-минеральные и органические сапропели.

Впервые в малых сапропелевых озерах исследуемых регионов детально изучены процессы пресноводного восстановительного диагенеза: трансформация органического вещества, механизмы бактериальной сульфатредукции, метаморфизация состава поровых вод и образование аутигенных минералов.

Практическая значимость. Полученные результаты исследований могут стать фундаментом для дальнейшего геохимического изучения и освоения сапропелевых месторождений сибирского региона и разработки рекомендаций по рациональному использованию озерных сапропелей в народном хозяйстве. Выявленное обогащение сапропелей исследованных озер микроэлементами дает основание рекомендовать их для применения в сельском хозяйстве.

Защищаемые положения:

1. На протяжении голоцена в исследованных озерах юга Западной Сибири формируются сапропели макрофитного генезиса (источник органического вещества (ОВ) — высшая водная растительность), а в озерах Восточного Прибайкалья формируются богатые N сапропели планктонного генезиса (источник ОВ — фито- и зоопланктон). Органическое вещество сапропелей подвержено глубоким процессам трансформации (при непосредственном участии микроорганизмов) уже в самых верхних интервалах осадка и существенно отличается по химическому составу от органического вещества продуцентов. Преобразуясь, органическое вещество сапропелей теряет лабильные, легкогидролизуемые компоненты, представленные $(C, P, N)_{орг}$, которые накапливаются в жидкой фазе осадка, существенно меняя химический состав поровых вод.

2. Геохимической особенностью органо-минеральных сапропелей юга Западной Сибири является высокое содержание Са в составе аутигенных карбонатов (представленных низко- и высокомагнезиальным кальцитом) и арагонита, что определяет геохимическое поведение ряда элементов, таких как Sr, Mg и Mn. Геохимической особенностью органических сапропелей Восточного Прибайкалья является низкое содержание Са на фоне высоких значений биогенного (аморфного) Si в составе створок диатомовых водорослей.

3. Для сапропелей исследованных озер характерна развитая стадия восстановительного диагенеза, в ходе которого происходит значительная перестройка минерального комплекса осадка, трансформация химического состава поровых вод и образование аутигенных минералов, прежде всего пирита. Интенсивность бактериальной сульфатредукции в сапропелях озер юга Западной Сибири существенно выше, чем в озерах Восточного Прибайкалья, что обусловлено рядом факторов: количеством сульфат-иона в поровых водах, численностью сульфатредуцирующих бактерий и степенью доступности органического вещества.

Фактический материал и методы исследования. В основу диссертационной работы положены материалы, полученные автором лично при проведении экспедиционных работ в составе отрядов ИГМ СО РАН на территории юга Западной Сибири и совместно с сотрудниками ИГХ СО РАН в Восточном Прибайкалье. Автор принимал непосредственное участие в бурении скважин в озерах Минзелинское, Большие Тороки, Иткуль и Котокель в экспедициях 2011–2013 г.г. под руководством д.г.-м.н. С.К. Кривоногова, разгрузке кернов и герметичной их упаковке, определении Eh и pH озерной воды и донных осадков в керне. В лабораторных условиях автором проведено описание вещественного состава и стратиграфии одиннадцати кернов, подготовка образцов донных осадков к химическим анализам, определение в них влажности, плотности и карбонатов. Количество изученных проб: донных осадков — 200, биологических объектов — 56, озерных вод — 25, поровых вод — 70. Содержание карбонатов определено в 186 образцах донных осадков, минеральный состав — в 25, элементный состав органического вещества (C, H, N, S) — в 83. Количественное определение содержания химических элементов в озерных и поровых водах, донных осадках и биообъектах было выполнено комплексом современных высокочувствительных методов анализа. Базовым аналитическим методом являлась атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС) (лаборатория геохимии благородных и редких элементов и экогеохимии ИГМ СО РАН, аналитики — В.Н. Ильина, к.х.н. Ж.О. Бадмаева, Н.В. Андросова). Отдельные образцы донных осадков проанализированы методами масс-спектрометрии и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС и ИСП-АЭС) в АЦ ИГМ СО РАН (аналитики — к.х.н. И.В. Николаева, к.х.н. С.В. Палесский, С.Ф. Нечепуренко), рентгенофлуоресцентным методом с использованием синхротронного излучения ускорителя ВЭПП-3 (РФА-СИ) в Институте ядерной физики СО РАН (аналитик — к.г.-м.н. В.А. Бобров, И.С. Кириченко). Минеральный состав осадков исследован рентгеноструктурным анализом на рентгеновском дифрактометре «ARL X'TRA». (лаборатория геологии кайнозоя, палеоклиматологии и минералогических индикаторов климата ИГМ СО РАН, аналитик — Л.В. Мирошниченко). Часть проб биологических объектов и донных осадков изучались на сканирующем электронном микроскопе (TESCAN MIRA 3 LMU) с энергодисперсионной приставкой для микроанализа. Гидрохимический анализ озерных и поровых вод (титриметрический, турбиметрический, фотометрический методы) выполнен в Лаборатории контроля качества природных и сточных вод ФГУ «ВЕРХНЕОБЬРЕГИОНВОДХОЗ (аналитики — Т.М. Булычева, Г.Н. Кривопалова) и методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с УФ-детектированием в Лимнологическом институте СО РАН (аналитики — И.В. Томберг, Н.П. Сезько, И.Н. Доля). Возраст сапропелевых толщ продатирован радиоуглеродным методом (C^{14}) и методом ускорительной масс-спектрометрии (YMS ^{14}C) в лаборатории

«Геохронология кайнозоя» ЦКП СО РАН (аналитики к.г.-м.н. Орлова Л.А., Петрожицкий А.В.). Элементный анализ органического вещества (C, H, N, S) в кернах выполнен в лаборатории микроанализа НИОХ СО РАН (аналитик — к.х.н. В.Д. Тихова). Микробиологические исследования (определение численности и послойное распределение различных физиологических групп аэробных и анаэробных микроорганизмов в кернах донных осадков) проведены в Институте водных и экологических проблем ДВО РАН д.б.н. Л.М.Кондратьевой и в Лимнологическом институте СО РАН к.б.н. М.Ю. Суловой. Пиролитический анализ ОБ озерных сапропелей в варианте Rock-Eval проведен на анализаторе SR Analyzer фирмы HUMBLE Instr.Inc.TM в Институте нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН к.ф.-м.н. В.Н. Меленевским. Комплексный биологический анализ остатков организмов в вертикальных разрезах осадков выполнен в Институте водных и экологических проблем ДВО РАН к.б.н. Т.А. Копотевой. Все аналитические исследования проведены в аккредитованных лабораториях с применением аттестованных методик и стандартных образцов сравнения. Внутренний контроль качества измерений показал удовлетворительную сходимость результатов.

Достоверность защищаемых положений 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.

Апробация работы и публикации. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на Международных и Всероссийских конференциях, школах-семинарах: XIX, XX, XXI Международных научных конференциях (Школах) по морской геологии «Геология морей и океанов» (Москва, 2011, 2013, 2015), Всероссийском совещании, посвященном 95-летию со дня рождения академика Л. В. Таусона «Современные проблемы геохимии (Иркутск, 2012), Международной конференции «The 6th International Siberian Early Career GeoScientists Conference» (Новосибирск, 2012), II Всероссийской молодежной научной конференции «Геология Забайкалья» (Улан-Удэ, 2012), Всероссийской научно-практической конференции «Биологические системы: устойчивость, принципы и механизмы функционирования» (Нижний Тагил, 2012, 2017), Международной молодежной школе-семинар «Геохимия живого вещества» (Томск, 2013), Goldschmidt 2013 (Florence, Italy, 2013), VII Всероссийском литологическом совещании «Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории» (Новосибирск, 2013), VIII Всероссийском литологическом совещании «Эволюция осадочных процессов в истории Земли» (Москва, 2015), Российском совещании с международным участием «Геохимия литогенеза» (Сыктывкар, 2014), Всероссийской конференции с международным участием «Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидроэкологии Евразии» (Томск, 2015), IX Международной биогеохимической школе «Биогеохимия техногенеза и современные проблемы геохимической экологии» (Барнаул, 2015), Всероссийской конференции с международным участием «Водные экосистемы Сибири и перспективы их использования» (Томск, 2015), Минералогическом семинаре с международным участием «Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии» (Сыктывкар, 2016), VI Всероссийском симпозиуме «Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах» (Барнаул, 2017), Всероссийской конференции «Современные направления развития геохимии» (Иркутск, 2017).

Основное содержание и научные положения по диссертации изложены в 35 статьях и тезисах докладов, в том числе 6 статей опубликовано в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, 1 статья — за рубежом и 5 на английском языке в материалах конференций.

Объем и структура работы. Диссертация объемом 199 страниц состоит из введения, обзора литературы (1 глава), методов исследования (2 глава), объектов исследования (3 глава), результатов и их обсуждения (главы 4, 5, 6), заключения, списка литературы и приложения. Работа имеет 72 рисунка и 32 таблицы. Список литературы содержит 304 источника, из которых 55 на иностранных языках.

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

Первая глава содержит обзор литературных данных по современному состоянию изученности геохимии донных органогенных отложений малых озер (сапропелей) в сибирском регионе, а также анализ работ по пресноводному восстановительному диагенезу сапропелевых отложений.

Вторая глава содержит сведения об использованных методах полевых исследований: отбору колонок сапропелевых отложений с ненарушенной стратификацией, озерных вод и биопродуцентов. Приводится описание комплекса аналитических методов.

Третья глава включает сведения о физико-географической и геолого-геоморфологической характеристике территории расположения изучаемых озер. Приведены данные по химическому составу пород и почв водосборов, озерных вод, а также морфометрические параметры озер.

Четвертая глава посвящена геохимии органического вещества сапропелевых отложений типовых малых озер исследуемых регионов в сравнении с минеральными отложениями (мергелистые глины) оз. Иткуль. Рассматриваются источники и генезис современного и захороненного (фоссилизированного) органического вещества, трансформация его микроорганизмами в процессе раннего диагенеза. Детально представлена литостратиграфия, вещественный состав, распределение OB , C_{org} , основных биогенных элементов (C, H, N, S) в вертикальных разрезах озерных отложений. Приведены данные радиоуглеродного датирования возрастов голоценовых разрезов озерных отложений, приведены скорости осадконакопления в разных слоях стратифицированных разрезов отложений исследованных озер.

Пятая глава посвящена геохимии минеральной (зольной) компоненте сапропелевых отложений исследованных озер. Показана геохимическая специфика органо-минеральных сапропелей типовых озер юга Западной Сибири, представленных карбонатами хемогенной природы (низко- и высокомагнезиальные кальциты с примесью Sr и Mn) и биогенными карбонатами (арагонит). Геохимической особенностью бескарбонатных органо-минеральных и органических сапропелей озер Восточного Прибайкалья является накопление биогенного Si в зольной части осадка в составе створок диатомовых водорослей.

Шестая глава посвящена исследованию поведения Fe и Mn как индикаторов раннего диагенеза в сапропелевых отложениях. Показано, что диагенез органогенных образований в озерах проявляется в трансформации органического и минерального вещества донных осадков, изменении состава поровых вод, в перераспределении химических элементов в осадочных разрезах. Важной особенностью донных отложений континентальных озер, в отличие от морей и океанов, являются малые мощности зоны диагенеза, восстановительные условия, невысокие концентрации сульфат-иона, и, как следствие, протекание в этих условиях особого, так называемого пресноводного диагенеза.

В заключении кратко изложены наиболее важные результаты исследований.

Личный вклад. Диссертационная работа является самостоятельно выполненным научным исследованием. Автор лично участвовал в экспедиционных работах по бурению скважин в малых озерах юга Западной Сибири и Восточного Прибайкалья в 2011–2013 г.г. и получении кернов озерных отложений. Автор самостоятельно провел пробоподготовку полевого материала, комплекс работ по определению влажности, зольности, плотности,

содержанию карбонатов в кернах осадков, отжиму поровых вод. Автором лично проведена статистическая обработка данных, дана интерпретация полученных результатов и сформулированы защищаемые положения.

Диссертационная работа выполнялась в рамках реализации проекта РФФИ «Диогенез озерно-болотных отложений подгорно-равнинной полосы южно-байкальского побережья и лесостепной зоны Западной Сибири» (№11-05-00655) и Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН «Условия формирования, закономерности размещения и рациональное природопользование сапропелей Сибири».

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю д.г.-м.н. Г.А. Леоновой за методическую помощь и ценные советы на всем протяжении выполнения работы и заведующему лабораторией д.г.-м.н. С.М. Жмодику, в которой были выполнены исследования. Особая благодарность — д.г.-м.н. С.К. Кривоногову за обучение методам вибрационного бурения озерных отложений. Большую поддержку в методическом плане и аналитических работах оказали автору к.г.-м.н. В.А. Бобров (РФА-СИ) и к.ф.-м.н. В.Н. Меленевский (метод пиролиза). Искренняя благодарность к.г.-м.н. Е.В. Лазаревой за сотрудничество в исследовании вещественного состава образцов озерных сапропелей на электронном микроскопе, к.г.-м.н. А.А. Богуш — за изучении форм нахождения химических элементов в озерных и поровых водах и механизмов аутигенного минералообразования, Л.В. Мирошниченко — за исследование минерального состава донных отложений, д.б.н. Л.М. Кондратьевой — за микробиологические исследования. На заключительных этапах работы весьма полезными были советы и обсуждение полученных результатов д.г.-м.н. Г.Н. Аношина, д.г.-м.н. Э.П. Солотчиной, д.г.-м.н. С.К. Кривоногова, к.г.-м.н. И.Н. Маликовой, к.г.-м.н. Ю.И. Восель, к.г.-м.н. В.А. Бычинского. Автор выражает искреннюю признательность всем коллегам аналитикам за помощь в выполнении работы — к.х.н. Ж.О. Бадмаевой, В.Н. Ильиной, Н.В. Андросовой, к.г.-м.н. М.С. Мельгунову, к.х.н. В.Д. Тиховой, к.т.н. Н.Г. Кармановой.

Защищаемые положения

Положение 1. На протяжении голоцена в исследованных озерах юга Западной Сибири формируются сапропели макрофитного генезиса (источник органического вещества (ОВ) — высшая водная растительность), а в озерах Восточного Прибайкалья формируются богатые N сапропели планктонного генезиса (источник ОВ — фито- и зоопланктон). Органическое вещество сапропелей подвержено глубоким процессам трансформации (при непосредственном участии микроорганизмов) уже в самых верхних интервалах осадка и существенно отличается по химическому составу от органического вещества продуцентов. Преобразуясь, ОВ сапропелей теряет лабильные, легкогидролизуемые компоненты, представленные $(C, P, N)_{org}$, которые накапливаются в жидкой фазе осадка, существенно меняя химический состав поровых вод.

Сапропели озер юга Западной Сибири имеют неоднородный вещественный состав. В них можно выделить два стратиграфических горизонта: верхний представлен сапропелем макрофитного генезиса, в формировании которого участвовала водная растительность, нижний представлен торфянистым сапропелем, в его образовании принимала участие преимущественно наземная растительность (рис. 1А). Интервалы, представленные торфянистым сапропелем, маркируют начало формирования этих озер, которые развивались на месте заболоченных низин. Отложения типовых озер Прибайкалья имеют однородный вещественный состав и представлены сапропелем планктонного генезиса (рис. 1Б). Сапропели прибайкальских озер характеризуются более высоким содержанием ОВ и низкой зольностью. По данным радиоуглеродного датирования, сапропели всех исследованных озер сформировались в голоцене за период в 5–10 тыс. лет.

Исследованные озера юга Западной Сибири по классификации Т.Н. Покровской [1983] отнесены к типичным макрофитным озерам: они мелководны, с обширной зоной литорали, заросшей макрофитами, которые являются основными продуцентами органического вещества. Озера Прибайкалья относятся к типичным фитопланктонным: они глубоководные, с малой зоной литорали, основная продукционная роль в них принадлежит фитопланктону.

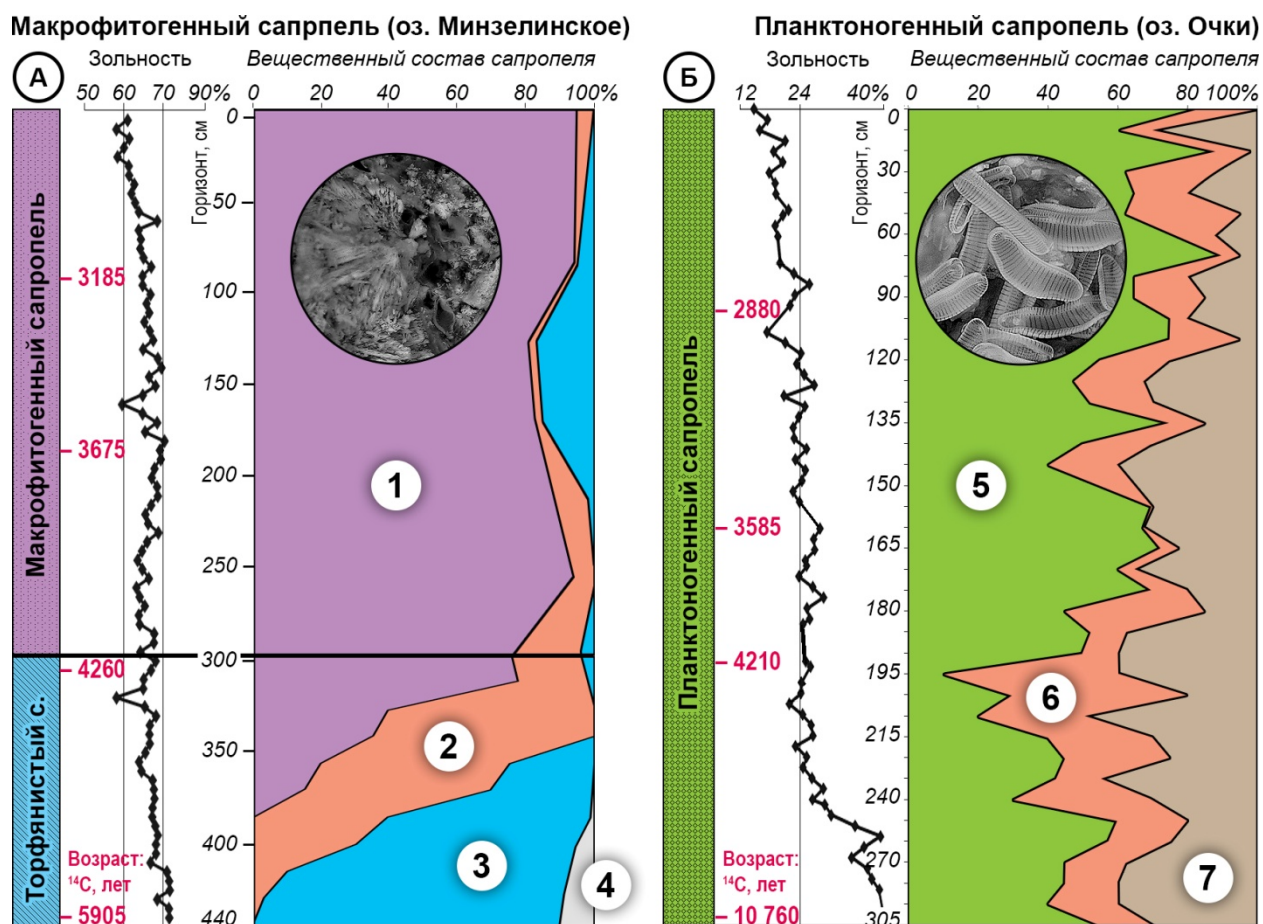


Рис. 1. Биостратификация голоценовых разрезов сапропеля оз. Минзелинское (А) и оз. Очки (Б) по данным комплексного биологического анализа, выполненного к.б.н. Т.А. Копотевой (ИВЭП ДВО РАН). 1 — макрофиты погруженные, 2 — зеленые мхи, 3 — макрофиты полупогруженные (гелофиты), 4 — раковины моллюсков, 5 — планктон (фито- и зоо-), 6 — зеленые и сфагновые мхи, 7 — хлопья гумуса

Источники поступления и генезис захороненного органического вещества по глубине стратифицированных разрезов сапропелевых отложений установлены методом послойного количественного подсчета остатков организмов. Биостратификация 4,4-метрового разреза сапропеля оз. Минзелинское (рис. 1А) указывает на гетерогенную природу ОВ: в период времени (5905–4260 л.н., низинное болото) шло формирование торфянистого сапропеля за счет прибрежных полупогруженных макрофитов и зеленых мхов (аллохтонный источник ОВ). В последующие временные периоды (4260 л.н. и по настоящее время) из-за повышения уровня воды произошло подтопление низинного болота (образовалось озеро) и началось формирование макрофитогенного сапропеля (основной источник автохтонного ОВ — погруженные макрофиты).

Биостратификация 3-метрового разреза сапропеля оз. Очки (рис. 1Б) указывает на гетерогенную природу ОВ: на протяжении всех 10760 лет в оз. Очки формировался планктоногенный сапрпель (автохтонный источник ОВ — фито- и зоопланктон), а с

заболоченных берегов в донный осадок поступали остатки тканей зеленых и сфагновых мхов, гумусовые вещества (аллохтонный источник ОВ).

Разные продуценты ОВ (макрофиты и планктон) имеют различный химический состав: планктон существенно богаче N, вследствие этого планктоногенные сапропели характеризуются более высоким содержанием N (табл. 1). В процессе захоронения органическое вещество продуцентов значительно меняет свой вещественный состав, теряя лабильные, легкогидролизуемые компоненты белково-углеводного комплекса, представленного преимущественно N, содержание которого уменьшается по глубине разреза, на что указывает увеличение отношения C/N в нижних интервалах осадка.

В макрофитогенных сапропелях исследованных озер юга Западной Сибири доминирует ОВ аллохтонного происхождения ($C/N > 12$), представленное погруженными макрофитами (тростник, рогоз), а в планктоногенных сапропелях озер Восточного Прибайкалья, например в оз. Духовое, — доминирует ОВ автохтонного происхождения ($C/N < 12$), представленное планктоном (табл. 1).

Таблица 1. Элементный состав органического вещества продуцентов и сапропелей

Горизонт, см/ продуценты	Зольность %	C	H	N	S	C/N
		% от органического вещества				
Макрофитогенные сапропели (юг Западной Сибири)						
Оз. Минзелинское						
0–5	38,9	42,3	5,4	3,1	> 0,2	13,5
10–15	39,9	41,6	5,3	3,3	> 0,2	12,5
95–100	41,0	36,8	4,2	2,8	> 0,2	15,3
420–425	55,6	37,7	3,5	2,3	1,0	16,5
Планктоногенные сапропели (Восточное Прибайкалье)						
Оз. Духовое						
0–5	32,2	51,4	7,5	4,8	1,1	10,8
15–20	29,0	52,2	7,4	4,7	1,6	11,2
145–150	24,6	55,2	7,6	4,2	1,1	13,1
175–180	26,0	54,2	7,4	4,0	1,4	13,6
Средний химический состав органического вещества продуцентов						
Макрофиты	7,3	39,0	5,9	1,6	0,8	24,1
Планктон	5,8	48,7	6,9	6,0	1,0	14,9

Анализ форм пирограмм (спектров продуктов пиролиза) дает представление о трансформации ОВ сапропелей в диагенезе. В верхних интервалах сапропелей установлено присутствие керогена — фоссилизированного органического вещества, преобразованного в анаэробных условиях (рис. 2). Это свидетельствует о процессах трансформации органики уже в самых верхних интервалах осадка. Захороненное органическое вещество существенно отличается по составу от такового продуцентов. Независимо от генезиса ОВ (планктонного или макрофитного), трансформация захороненной органики идет схожим образом — все лабильные компоненты (рис. 2: белки — 1, липиды и углеводы — 2) подвергаются деструкции на ранних стадиях диагенеза. Поэтому их пики отсутствуют в пирограммах всех типов сапропелей.

Деструкция ОВ сапропелей осуществляется микроорганизмами различных физиологических групп, послойное распределение которых по вертикали голоценовых разрезов осадков представлено в табл. 2. Максимальное содержание микроорганизмов приурочено к верхним интервалам осадка и обусловлено наличием легкодоступной органики. Высокая численность всех индикаторных групп микроорганизмов, отражающих динамику анаэробных процессов денитрификации и деструкции органического вещества, свидетельствует о присутствии в осадках лабильных органических компонентов,

вовлеченных в современные биогеохимические процессы. Окислительные условия в верхней зоне осадка сменяются на восстановительные по глубине разрезов. Таким образом, деструкция органического вещества идет в анаэробных условиях при непосредственном участии микроорганизмов.

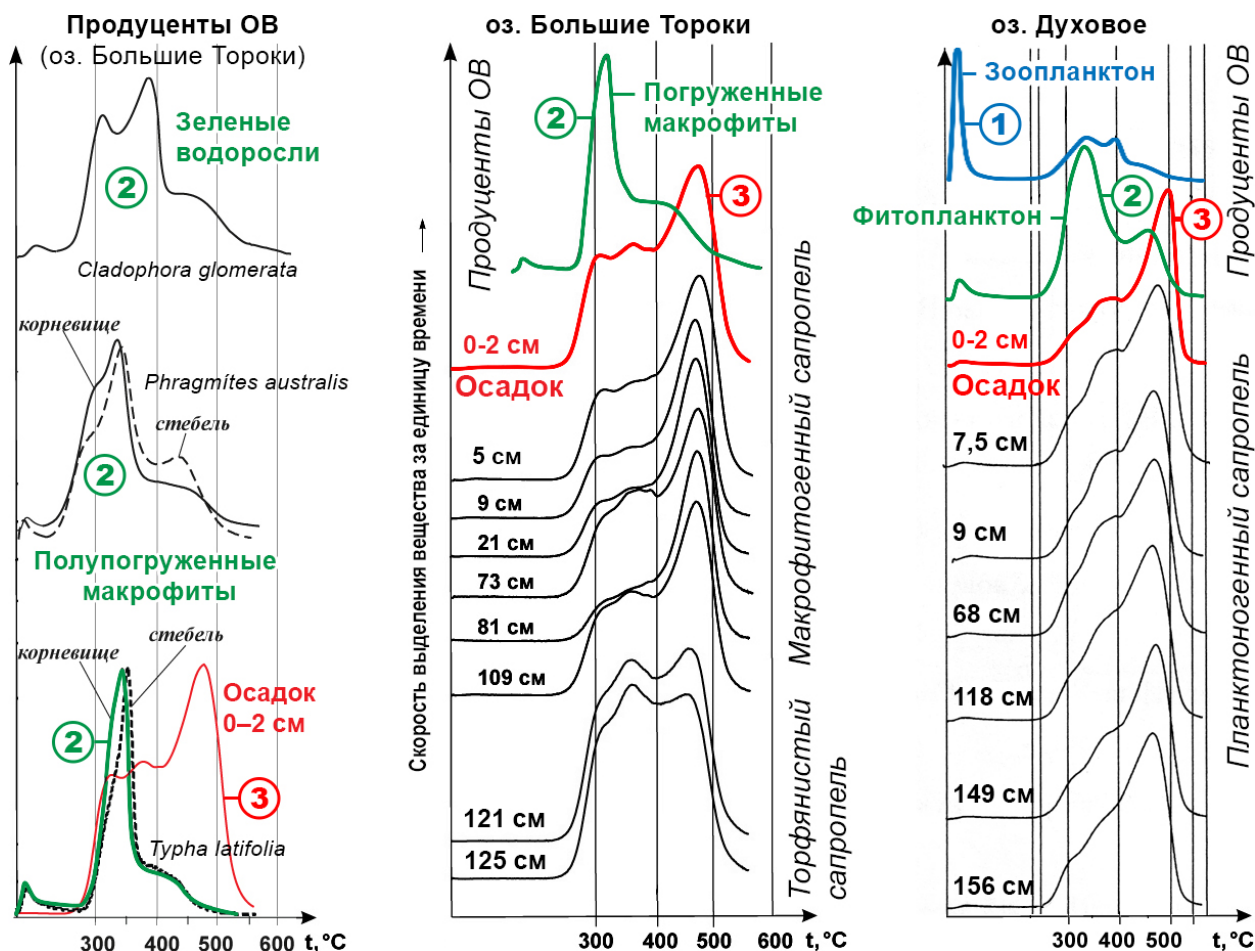


Рис. 2. Пирограммы продуцентов ОВ и сапропеля оз. Большие Тороки и оз. Духовое (аналитик: к.ф.-м.н. Меленевский В.Н., ИНГГ СО РАН). Состав продуцентов ОВ (легкогидролизуемые вещества) — белки (1), липиды и углеводы (2) и преобразованное ОВ осадка — кероген (3)

Выявлено значительное обогащение поровых вод поверхностных горизонтов осадков исследуемых озер биогенными элементами HCO_3^- , NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} (рис. 3), что является следствием микробиологической деструкции органического вещества, в результате которой в поровый раствор переходят наиболее подвижные лабильные компоненты органики, а в осадках формируются восстановительные условия и образуется H_2S . Концентрации $(\text{C}, \text{N}, \text{P})_{\text{орг}}$ и HCO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} в поровой воде уже верхнего слоя осадков значительно превышают их содержания в наддонной воде. А с углублением в толщу осадков концентрации этих элементов в поровых водах возрастают.

Установлена трансформация поровых вод в процессе раннего диагенеза сапропелевых отложений исследованных озер, приводящая к увеличению в них минеральных форм органического вещества (HCO_3^- , NH_4^+ , HPO_4^{2-}), что выявляет механизм анаэробного окисления ОВ микроорганизмами. Уменьшение же содержания SO_4^{2-} в поровых водах по глубине разрезов есть отражение процесса сульфатредукции вследствие восстановления SO_4^{2-} при участии сульфатредуцирующих бактерий, количество которых возрастает к нижним интервалам осадка (табл. 2).

Таблица 2. Послойная численность микроорганизмов в сапротеле в колониеобразующих единицах на грамм осадка (КОЕ/г). ОЧМ — общая численность микроорганизмов

Глубина, см	Eh, мВ	Физиологические группы микроорганизмов, КОЕ/г × 10 ⁵			
		ОЧМ	гетеротрофные	сульфатредуцирующие	аммонифицирующие
Макрофитогенные сапротели (юг Западной Сибири)					
Оз. Большие Тороки					
5	-3	2970	29,2	3,5	14,5
35	-160	2490	20,9	5,0	11,9
115	-170	2300	26,4	7,0	7,7
Оз. Минзелинское					
5	-21	406,7	337,0	Не определяли	16,7
45	-174	124,9	56,6		8,3
105	-181	109,5	23,3		6,1
225	-186	34,5	15,7		5,6
Планктоногенные сапротели (Восточное Прибайкалье)					
Оз. Котокель					
5	+10	952,1	Не определяли	0,3	Не определяли
120	-76	638,3		2,7	
180	-120	759,8		4,7	
320	-162	660,0		3,3	
Оз. Духовое					
5	Нет данных	6,3	3,0	0,009	2,0
70		4,2	0,2	0,014	0,1
115		2,1	0,3	0,218	0,2

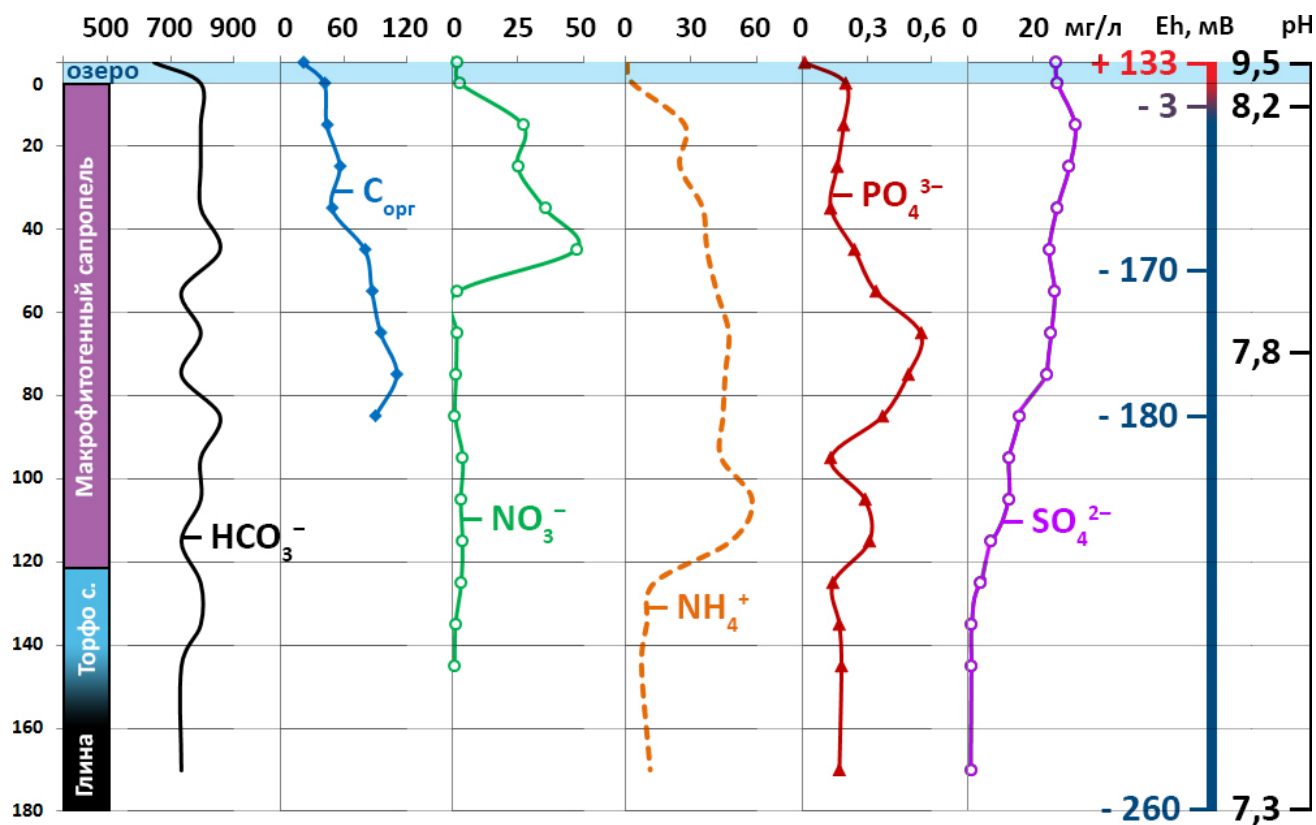


Рис. 3. Распределение pH, Eh (мВ), $C_{орг}$, HCO_3^- , NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} в озерной и поровой воде сапротеля оз. Большие Тороки

Положение 2. Геохимической особенностью органо-минеральных сапропелей Западной Сибири является высокое содержание Са в составе аутигенных карбонатов представленных низко- и высокомагнезиальным кальцитом и арагонита, что определяет геохимическое поведение ряда элементов, таких как Sr, Mg и Mn. Геохимической особенностью органических сапропелей Прибайкалья является низкое содержание Са на фоне высоких значений биогенного (аморфного) Si в составе створок диатомовых водорослей.

Озерные сапропели состоят из мелкодисперсного органического вещества, небольшого количества слаборазложившихся остатков растительности и водных организмов, неорганических компонентов биогенного происхождения и минеральных примесей. Минеральные примеси составляют большую часть (иногда всю) зольного вещества сапропелей, которая изменяется в широких пределах от 23 до 70%. Химический состав зольной части сапропелей представлен в основном — SiO_2 (1,1–55), CaO (0,1–52), Fe_2O_3 (0,1–10) и Al_2O_3 (0,1–7,1%). Минеральный состав сапропелей чаще всего представлен глинистыми, карбонатными, песчанистыми и мелкоалевритовыми терригенными частицами. Сапропели озер юга Западной Сибири характеризуются повышенным содержанием CaO в отличие от сапропелей озер Восточного Прибайкалья. Сапропель оз. Котокель характеризуется самым высоким отношением кремния к алюминию, что свидетельствует о дополнительных источниках Si в осадке помимо терригенной компоненты.

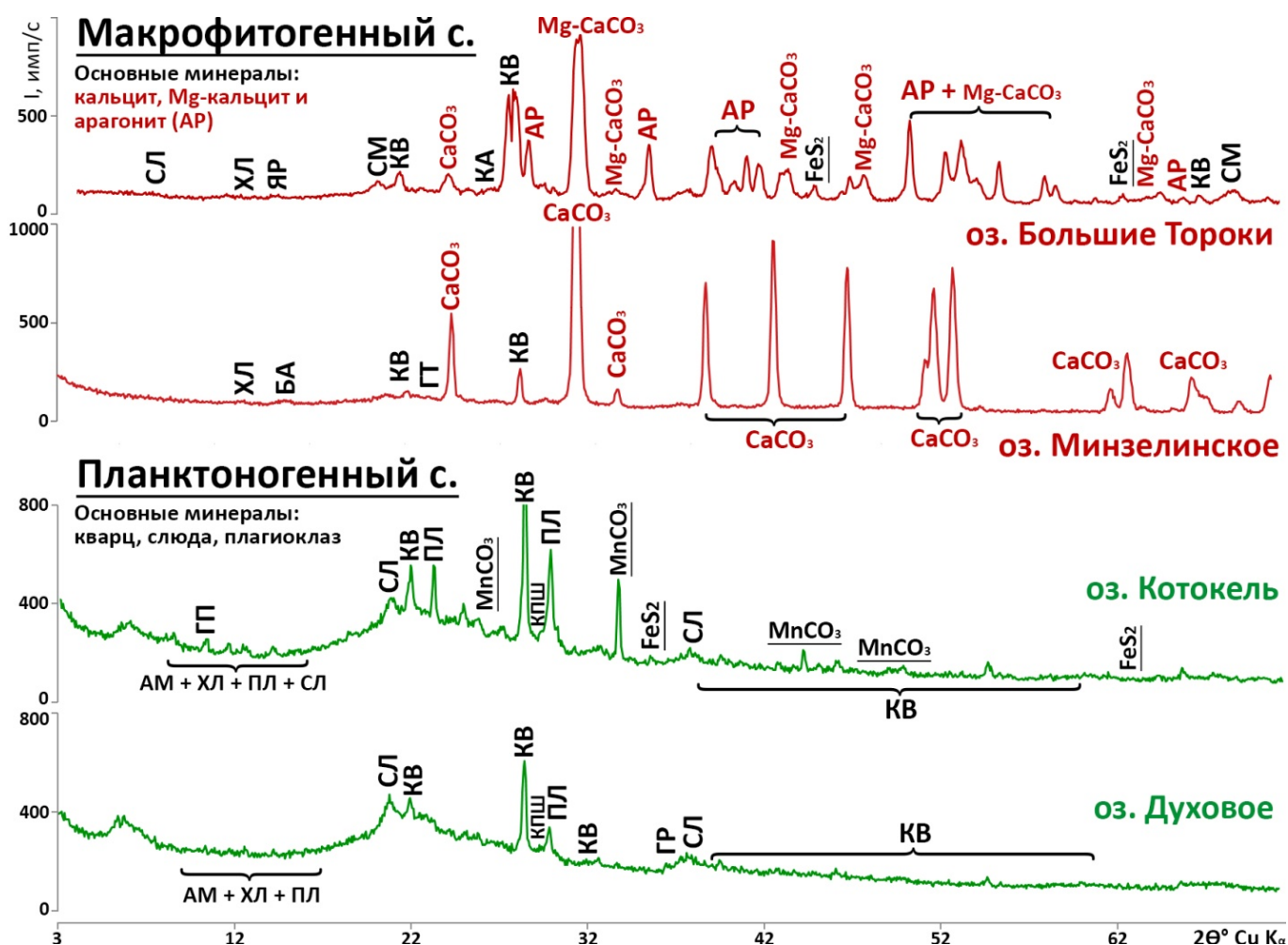


Рис. 4. Дифракционные спектры разных слоев макрофитогенных и планктоногенных сапропелей. KB — кварц, СЛ — слюда, AP — арагонит, ХЛ — хлорит, ЯР — ярозит, СМ — смектит, КА — каолинит, БА — бассанит, ГП — гипс, ПГ — плагиоклаз, АМ — амфибол, КПШ — полевые шпаты

Зольная часть осадков озер юга Западной Сибири представлена минералами карбонатного ряда — это низко- и высокомагнезиальные кальциты (рис. 4). Также в материале осадков часто встречается арагонит, представленный раковинами моллюсков и рачков остракод. Поэтому, высокое содержание СаО и карбонатов в осадках является основной геохимической особенностью, которая отличает озера юга Западной Сибири от озер Восточного Прибайкалья. Для байкальских озер характерно полное отсутствие карбонатов в минеральном составе осадков. Помимо этого, для всех озер основу минеральной части осадка составляют алюмосиликаты и кварц. Часто встречаются хлорит, плагиоклаз, амфибол, КПШ. А для озер Восточного Прибайкалья в минеральной части присутствуют еще и слюды (в основном, разупорядоченные), часто представленные биотитом и мусковитом. В донных осадках всех озер (в разном количестве) присутствует гипс и барит. В минеральном материале сапропеля, в составе элювиальных отложений, концентрируются устойчивые минералы, такие как циркон, минералы группы Ti (рутил, ильменит), монацит. Почти во всех озерах встречается пирит (за исключением оз. Очки).

В мелководных и прогреваемых озерах юга Западной Сибири, густо заросших водной растительностью, в условиях щелочных значений pH и высокой минерализации воды создаются благоприятные условия для хемогенного осаждения карбонатов (табл. 3), которые при достижении произведения растворимости выпадают в осадок, формируя сапропели карбонатного ряда с высоким содержанием Са.

Таблица 3. Состояние карбонатно-кальциевого равновесия водной массы исследованных озер в летний период. М — минерализация. СаСО₃ — содержание карбонатов в неконсолидированном осадке (0–2 см). S/St — отношение произведения активностей Са²⁺ и НСО₃⁻ к значению СаСО₃. К_x — коэффициент водной миграции Са

Озеро	Глубина м	t °С	pH	М мг/л	НСО ₃ ⁻ мг/л	Са ²⁺ мг/л	СаСО ₃ %	S/St	К _x
Озера юга Западной Сибири									
Минзелинское	0,6	24,1	8,3	227	158	20	57	7,53	0,8
Б. Тороки	0,8	22,4	9,5	1081	646,6	15,2	30	4,26	0,2
Озера Восточного Прибайкалья									
Котокель	0–0,5	16,9	6,9	86	48,8	8,8	0,3	0,03× 10 ⁻³	21,7
	0,5–3,0	16,8	6,6	87	54,9	8,0			
Духовое	2,8	25,3	7,1	122	58,6	9,0	> 0,1	—	9,3

Примечания: К_x = m_x×100 / a×n_x, где m_x — содержание элемента x в воде, г/л; n_x — содержание элемента x в донном осадке, % вес.; a — минерализация, г/л [Перельман, 1982]. Прочерк — нет данных

Геохимическая специфика сапропелей хорошо проявляется при сравнении их коэффициентов обогащения, полученных путем нормирования среднего состава отдельных слоев сапропелей на кларки глинистого сланца [Li,1991] и Al. Установлено обогащение сапропелевых отложения озер Западной Сибири Са и Sr, основным источником которых являются карбонаты (рис. 5). Сапропели озер Прибайкалья обогащены Si (большая часть которого представлена биогенным кремнеземом створок диатомовых водорослей), а также Fe, источником которого может являться планктон. Стоит отметить, что для всех типов сапропелей характерно обогащение рядом биофильных элементов (Cu, Zn и Ag), которые они наследуют от продуцентов ОВ, что хорошо видно при сравнении с минеральным осадком оз. Иткуль (рис. 5, п.5).

Таким образом, геохимическая специфика сапропелей исследованных озер, выявленная при сравнении их коэффициентов обогащения, выражается в следующем. 1. в обогащении планктоногенных сапропелей озер Восточного Прибайкалья биогенным Si (источником являются створки диатомовых водорослей), а также Fe (источником которого

может являться планктон); 2. обогащение макрофитогенных сапропелей озер юга Западной Сибири Ca и Sr (источником являются седиментационные карбонаты).

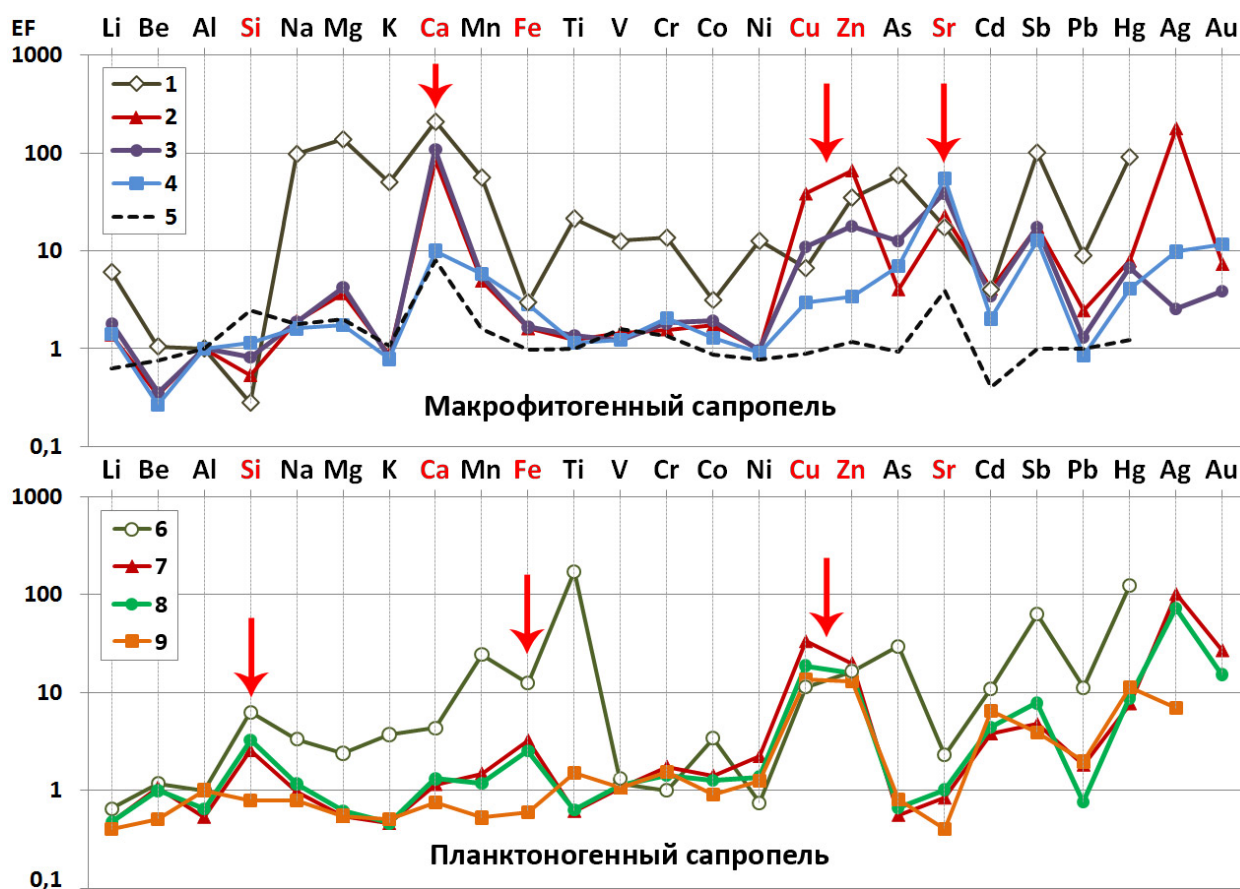


Рис. 5. Коэффициенты обогащения (EF) продуцентов ОВ и разных типов сапропелей химическими элементами относительно кларков глинистых сланцев [Li,1991] с предварительным нормированием на Al. Сапропели и продуценты озер Большие Тороки и Минзелинское: 1 — макрофиты, 2 — неконсолидированный осадок, 3 — макрофитогенный сапропель, 4 — торфянистый сапропель, 5 — мергелистая глина оз. Иткуль. Сапропели и продуценты озер Котокель и Духовое: 6 — планктон, 7 — неконсолидированный осадок, 8 — планктоногенные сапропели озер Котокель и Духовое, 9 — планктоногенный сапропель оз. Очки

Высокие содержания карбонатов в сапропелях озер юга Западной Сибири определяют геохимию ряда элементов, таких как Ca, Sr, отчасти Mg и Mn (рис. 6). Участки сапропеля с высоким содержанием арагонита характеризуются повышенным содержанием стронция и низкими значениями магния, т.к. арагонит всегда богат Sr и не содержит в своем составе Mg. В интервалах осадка с низкими содержаниями Mg-CaCO₃ и высокими арагонита (100–120 см) концентрации Mg в сапропеле несколько падают. В нижних глинистых интервалах осадка содержания Mg возрастают, так как основная часть Mg входит в состав терригенной компоненты, представленной алюмосиликатами. Распределение Ca, Sr и Mg в бескарбонатных сапропелях озер Восточного Прибайкалья совпадает с распределением элементов, отвечающих за терригенную компоненту осадка, в частности с Fe. В распределении Mn в карбонатных сапропелях западносибирских озер наблюдается хорошая корреляция с распределением Ca и обратная корреляция с распределением Fe. По-видимому, часть Mn изоморфно входит в состав CaCO₃. Особенно хорошо это видно на примере байкальского озера оз. Котокель, где в нижних интервалах осадка с ростом значений Ca увеличивается содержание Mn на фоне выдержанных значений Fe (рис. 6).

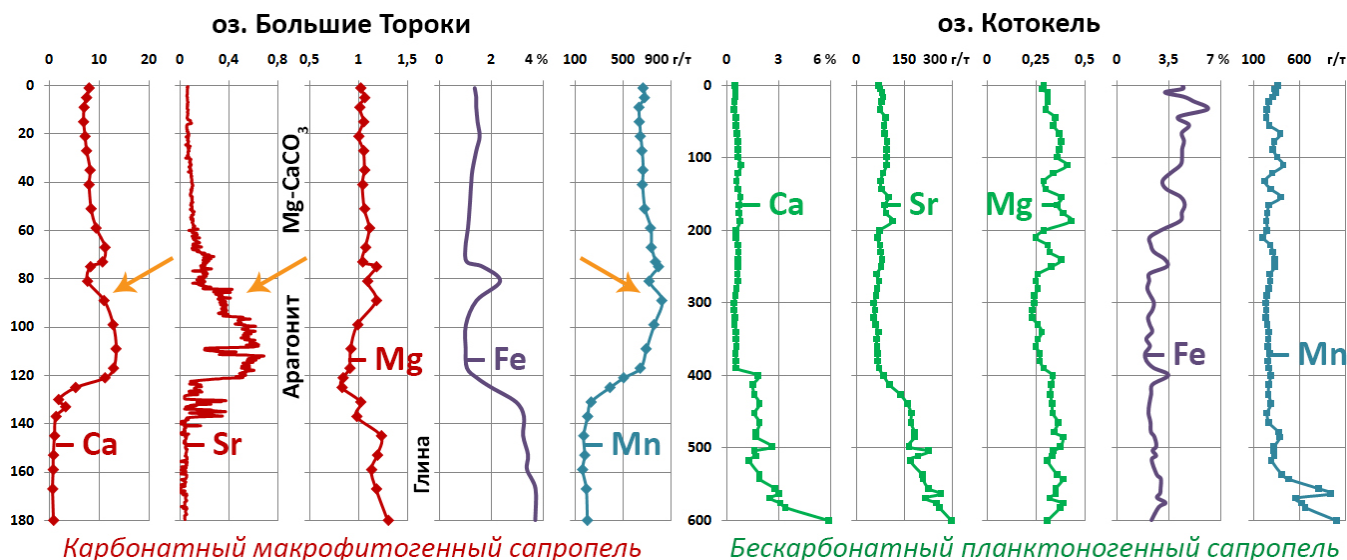


Рис. 6. Распределение элементов группы Ca в сравнении с распределением Fe и Mn в разных типах сапропелей — карбонатных и бескарбонатных

Действительно, по данным ЭПР было определено, что в известковистых сапропелях озер Большие Тороки и Минзелинское в составе карбонатов содержится от 47 до 166 мг/кг Mn, что составляет 10–20% от валового содержания Mn в осадках. Данные рентгенофазового анализа показали отсутствие собственных минералов марганца в материале известковистых сапропелей. Горизонты сапропеля, в которых встречается арагонит, характеризуются меньшими значениями Mn в составе карбонатов, т.к. арагонит в отличие от кальцита, как правило, не содержит в своем составе Mn.

Установлено доминирование карбонатной формы для Ca, Sr и Mg в осадках озер юга Западной Сибири (рис. 7). Высокие значения Sr, которым обычно богат арагонит, по-видимому, связаны с большими скоплениями раковин в осадке. В осадках озер Восточного Прибайкалья присутствие карбонатов не установлено, поэтому Ca, Sr и Mg представлены, преимущественно, остаточной формой (рис. 7).

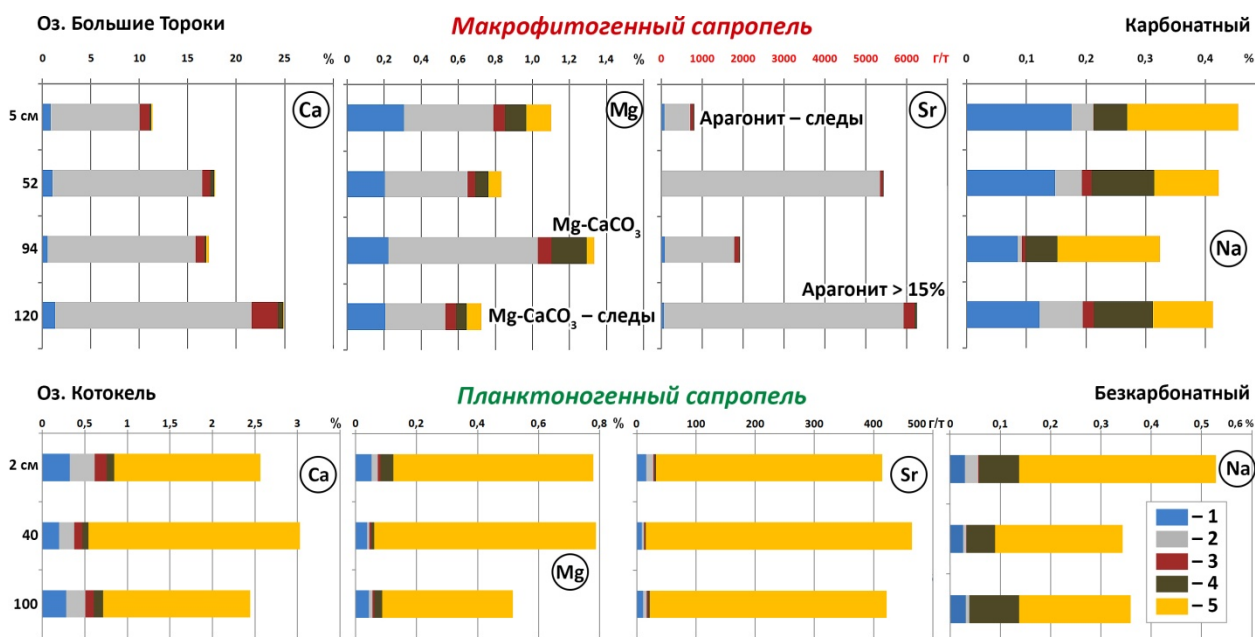


Рис. 7. Формы нахождения элементов в разных типах сапропелей. 1 — обменная форма, 2 — форма, связанная с карбонатами, 3 — форма, связанная с оксидами и гидроксидами, 4 — форма, связанная с ОВ и сульфидами, 5 — остаточная форма

Важным отличием планктоногенных сапропелей от макрофитогенных сапропелей является высокое содержание биогенного кремния, представленного створками диатомовых водорослей. Данная закономерность хорошо прослеживается на примере макрофитогенного сапропеля оз. Большие Тороки и планктоногенного сапропеля оз. Котокель (рис. 8). Фитопланктон являлся основным источником автохтонного органического вещества на протяжении всего периода формирования сапропелевых отложений оз. Котокель. Синезеленые водоросли создают основу органической массы сапропеля, а диатомовые водоросли — биогенный кремнезем в минеральной части осадка. Планктоногенный сапропель оз. Котокель обогащен биогенным (аморфным) кремнием в отличие от макрофитогенного сапропеля оз. Большие Тороки, где весь Si представлен в основном терригенной компонентой ($Si_{тер}$). Так, в составе сапропеля оз. Котокель валовый кремний ($Si_{вал}$) составляет в среднем 11% по разрезу, из которого почти половина приходится на биогенный ($Si_{био}$) кремнезем в составе створок диатомовых водорослей. Кривая распределение численности диатомей по [Кордэ, 1968] хорошо совпадает с распределением $Si_{био}$.

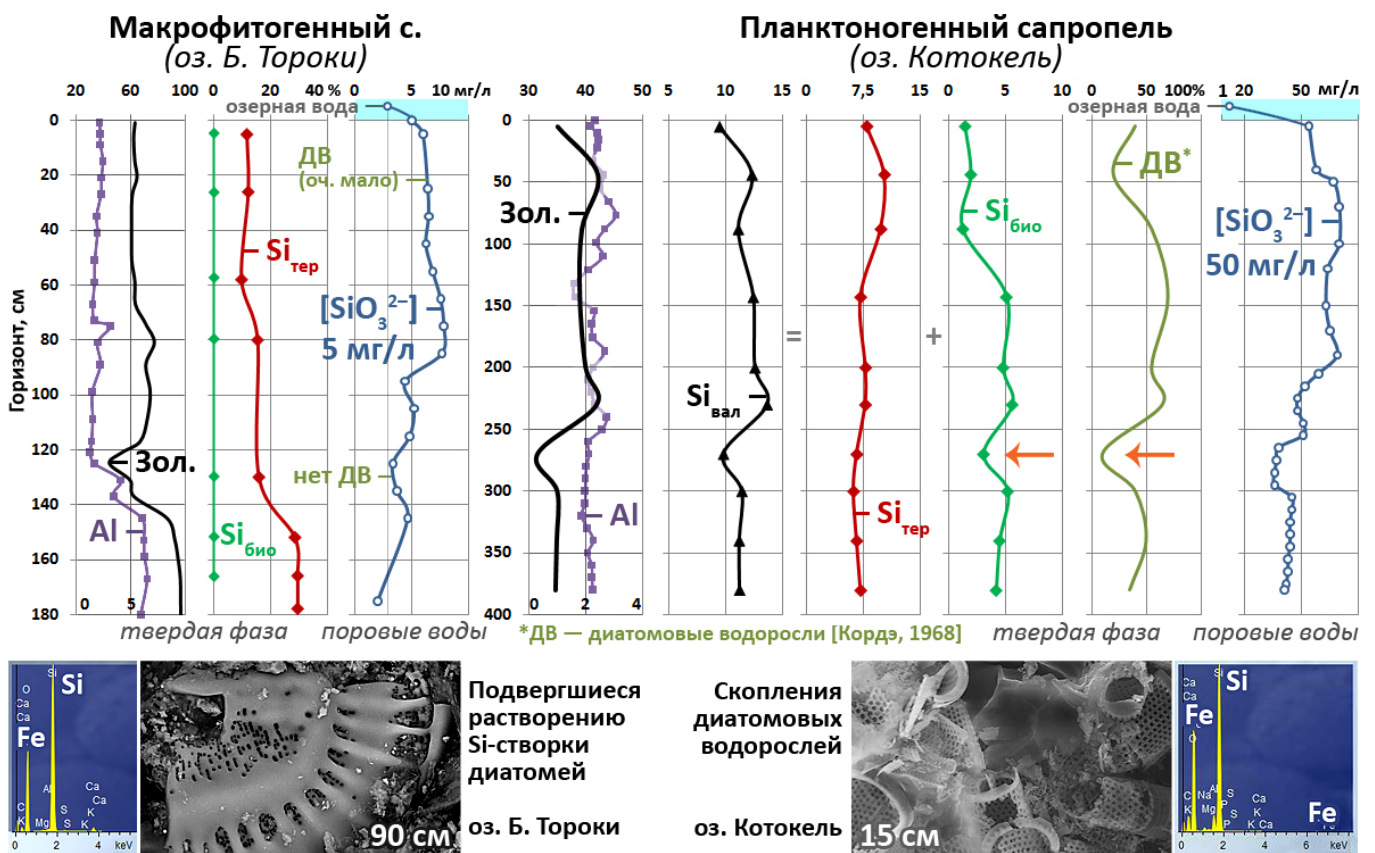


Рис. 8. Распределение по разрезу сапропелей озер Большие Тороки и Котокель зольности, Al, валового ($Si_{вал}$), терригенного ($Si_{тер}$) и биогенного кремния ($Si_{био}$), общей численности диатомовых водорослей (ДВ) по [Кордэ, 1968], а также содержание Si в поровых водах и поверхностной воде

Биогенный Si обладает большой подвижностью и, вследствие растворения створок диатомовых водорослей (рис. 8), он выщелачивается в поровые воды осадка, где его концентрации на порядок выше, чем в озерной воде. Так, в сапропеле оз. Большие Тороки в верхних горизонтах обнаружены единичные створки диатомовых водорослей с заметными следами растворения (рис. 8), а ниже по разрезу створки диатомей исчезают, и в поровых водах увеличивается концентрация растворенного Si. В этих же нижних горизонтах установлено присутствие аморфного (возможно переотложенного) кремнезема в органическом матриксе сапропеля.

Таким образом, по содержанию органического вещества и составу минеральной части все исследуемые типы сапропелей образуют два вполне определенных осадочных комплекса, которые связаны с географическим положением водоемов. Первый комплекс включает высокочольные органо-минеральные сапропели карбонатного ряда, которые образуются в седиментационных бассейнах исследованных озер юга Западной Сибири. В противоположность первому, второй комплекс представлен бескарбонатными низкочольными сапропелями органо-минерального и органического типа, которые образуются в исследованных озерах Прибайкалья.

Положение 3. Для сапропелей исследованных озер характерна развитая стадия восстановительного диагенеза, в ходе которого происходит значительная перестройка минерального комплекса осадка, трансформация химического состава поровых вод и образование аутигенных минералов, прежде всего пирита. Интенсивность бактериальной сульфатредукции в сапропелях озер юга Западной Сибири существенно выше, чем в озерах Восточного Прибайкалья, что обусловлено рядом факторов: количеством сульфат-иона в поровых водах, численностью сульфатредуцирующих бактерий и степенью доступности органического вещества.

В сапропелях исследованных озер установлено присутствие сульфидной формы железа (рис. 9Б), характерной для большинства современных восстановленных осадков. Среди минералов Fe в сапропелях всех озер наиболее распространен пирит. Полученные данные по формам серы показали, что в нижних интервалах осадка доминирует S (II), т.е. сера в составе H₂S (рис. 9В).

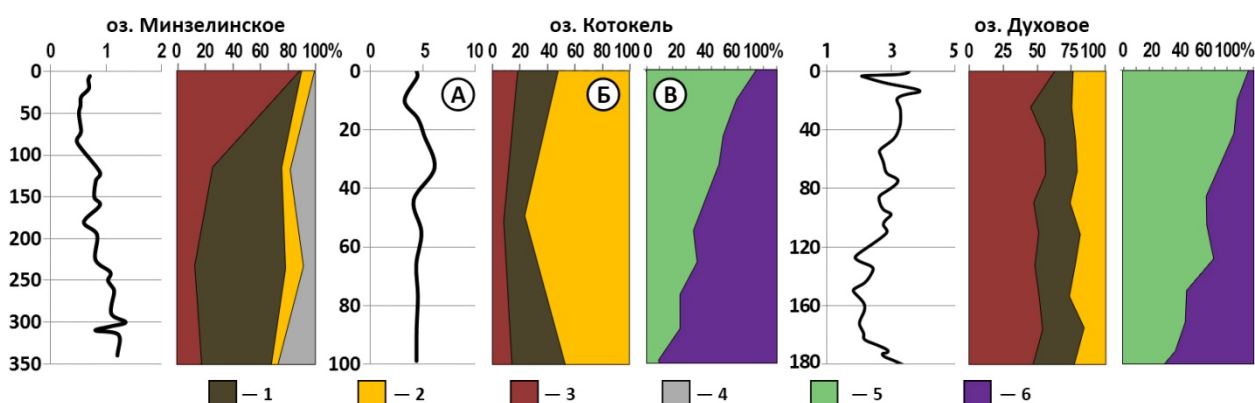


Рис. 9. Общее содержание (А) и доля различных форм железа (Б) в озерных осадках, %. Формы нахождения Fe: 1 — сульфидная, 2 — алюмосиликатная (обломочная), 3 — связанная с оксидами, гидроксидами и 4 — карбонатами. Распределение форм серы (В) в вертикальных разрезах осадков озер Духовое и Котокель: 5 — S (VI), 6 — S (II)

Таким образом, в осадках всех озер установлено присутствие сульфидной формы железа, доля которой увеличивается к нижним интервалам, что в значительной мере связано с процессами сульфатредукции и образования H₂S. При этом в осадках озер юга Западной Сибири содержание сульфидной формы Fe выше, чем в озерах Восточного Прибайкалья, что может косвенно свидетельствовать о более интенсивных процессах сульфатредукции в данных водоемах. В известковистом сапропеле оз. Минзелинское обнаружена форма Fe, связанная с карбонатами. Такое железо может входить как в состав CaCO₃, так и образовывать собственные минералы карбонатного ряда. Так, в нижних интервалах (156–178 см) известковистого сапропеля оз. Большие Тороки был обнаружен сидерит (FeCO₃).

Впервые для малых озер исследуемых регионов на примере длинных ненарушенных кернов показаны некоторые особенности механизмов бактериальной сульфатредукции и распределение в поровых водах Fe²⁺ и SO₄²⁻ на ранней стадии диагенеза (рис. 10).

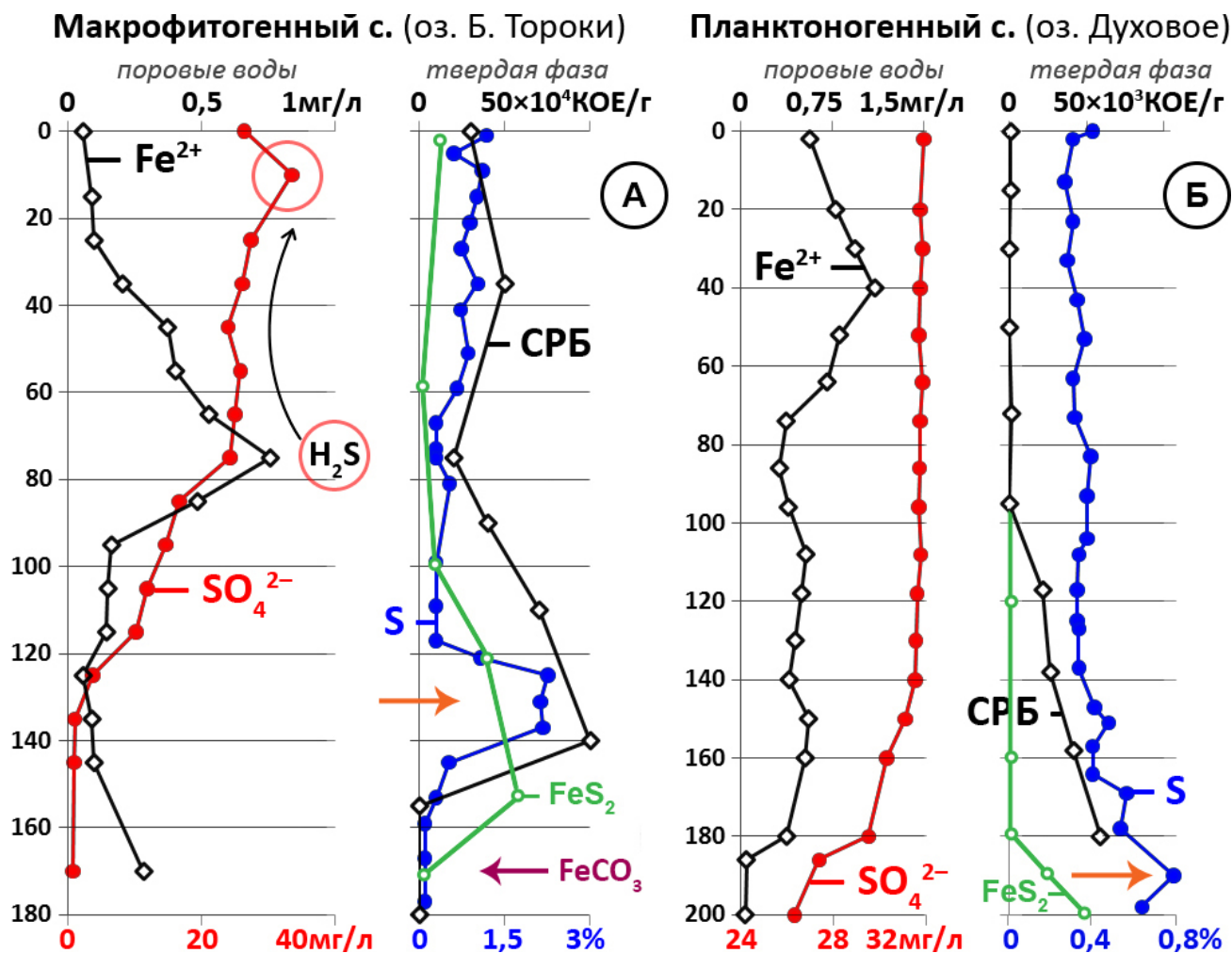


Рис. 10. Распределение в поровых водах донных отложений озер Большие Тороки и Духовое — Eh, Fe²⁺ (мг/л), SO₄²⁻ (мг/л), в твердой фазе осадка — сульфатредуцирующих бактерий (СРБ) в колониобразующих единицах на грамм (КОЕ/г) и S (%)

Уменьшение в поровых водах растворимых форм железа и сульфат-иона по глубине разрезов маркирует начало процессов бактериальной сульфатредукции, которая сопровождается восстановлением сульфата до сероводорода с образованием пирита. В интервалах, где наблюдается снижение концентраций ионов железа и сульфатов, установлено повышение численности сульфатредуцирующих бактерий и валовых содержаний S в твердой фазе осадка (рис. 10А).

Особенно хорошо данная закономерность прослеживается на примере макрофитогенного сапропеля оз. Большие Тороки, где установлена максимально интенсивная сульфатредукция с образованием большого количества сероводорода, часть которого, не успевая связаться с Fe, поступает в верхние интервалы осадка, где вновь окисляется на редокс-границе. В нижних интервалах, когда весь сульфат израсходован, образование пирита прекращается. При достаточных концентрациях гидрокарбонат-иона (732 мг/л) и при наличии Fe²⁺ в поровых водах здесь становится возможным образование сидерита, который был установлен методом рентгеноструктурного анализа. При вялых процессах сульфатредукции, что хорошо видно на примере планктоногенного сапропеля оз. Духовое (рис. 10Б), концентрация сульфат-иона по разрезу практически не изменяется и только в нижних интервалах с повышением численности сульфатредукторов содержания SO₄²⁻ падают, начинается образование пирита.

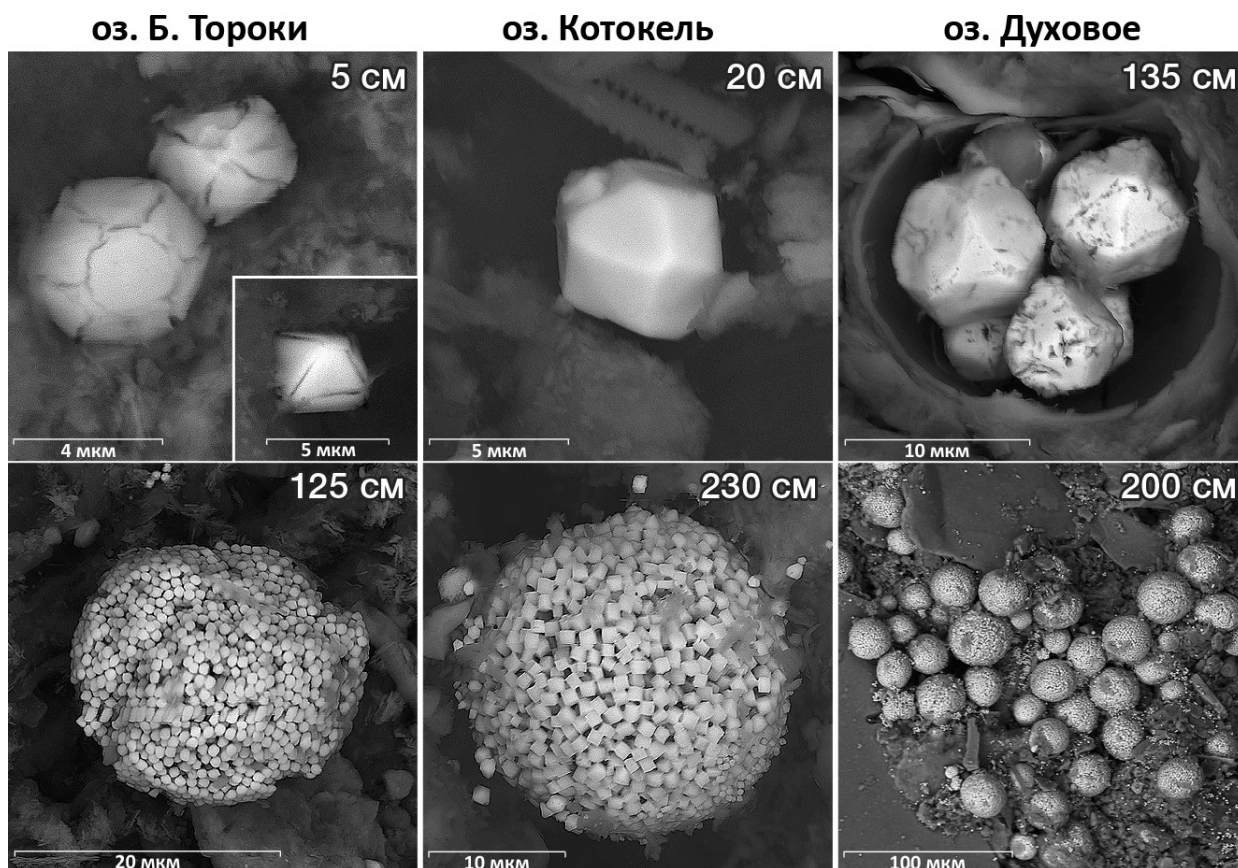


Рис. 11. Кристаллы и фрамбонды пирита из разных интервалов макрофитогенных (оз. Большие Тороки) и планктоногенных сапропелей (оз. Котокель и оз. Духовое) Фото — электронный сканирующий микроскоп TESCAN MIRA 3 LMU

В сапропелях пирит представлен отдельными кристаллами и скоплениями кристаллов, образующих шарообразные агрегаты — фрамбонды (рис. 11). Фрамбондальный пирит имеет биогенную природу и является результатом деятельности сульфатредуцирующих бактерий (СРБ). В сапропеле оз. Духовое пирит встречается только в цистах водорослей, возможно, что цисты являются благоприятной средой для развития сульфатредуцирующих бактерий, например, содержат легкодоступную органику.

Таким образом, интенсивность бактериальной сульфатредукции зависит не только от количества органического вещества, но и от степени его минерализации — сульфатредуцирующие бактерии способны утилизировать лишь сравнительно низкомолекулярное органическое вещество. Поэтому в природных обстановках сульфатредукция требует предварительной деструкции органического вещества.

Заключение

1. Распад попадающего в осадки органического вещества происходит в условиях анаэробной минерализации и начинается на самых ранних стадиях диагенеза. Уже в самых верхних интервалах осадка органическое вещество подвержено глубоким процессам трансформации и существенно отличается по составу от органического вещества продуцентов.
2. Для планктоногенных сапропелей озер Восточного Прибайкалья установлены самые низкие значения отношения $C_{орг}/N_{орг}$ (5,7–7,0), которые маркирует автохтонную компоненту в составе органического вещества (фитопланктон). Для озер юга Западной Сибири значения отношения $C_{орг}/N_{орг}$ более высокие (10–15) и попадают в

интервал значений для водной и наземной растительности, маркируя, тем самым, автохтонный (макрофиты) и аллохтонный (гипновые мхи) источники ОВ.

3. Геохимической особенностью органо-минеральных сапропелей юга Западной Сибири является высокое содержание Са в составе аутигенных карбонатов, представленных низко- и высокомагнезиальным кальцитом, и арагонита. Это определяет геохимическое поведение ряда элементов, таких как Sr, Mg и Mn.
4. Геохимической особенностью органических сапропелей Восточного Прибайкалья является низкое содержание Са на фоне высоких значений биогенного Si в составе створок диатомовых водорослей.
5. Важной геохимической особенностью всех исследованных сапропелей является обогащение верхних интервалов Cu и Zn, которые они наследуют в составе живого вещества.
6. Во всех исследованных озерах выявлен восстановительный тип диагенеза, в ходе которого происходит трансформация химического состава поровых вод и образование аутигенных минералов, прежде всего пирита, при непосредственном участии микроорганизмов — сульфатредуцирующих бактерий.
7. Установлена прямая зависимость между интенсивностями бактериальной сульфатредукции и аутигенного минералообразования. В процессе сульфатредукции наблюдается преобразование химического состава поровых вод — в них уменьшается количество SO_4^{2-} , который восстанавливается до сероводорода. Изменения в химическом составе поровых вод приводят к переходу из жидкой фазы в осадок соединений S и Fe с образованием пирита.

Список публикаций по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. **Мальцев А.Е.**, Леонова Г.А., Бобров В.А., Кривоногов С.К. Геохимические особенности голоценового разреза сапропеля озера Минзелинское (Западная Сибирь) // Известия Томского политехнического университета. — 2014. — Т. 325. — № 1. — С. 83–93.
2. **Мальцев А.Е.**, Леонова Г.А., Бобров В.А., Меленевский В.Н., Лазарева Е.В., Кривоногов С.К. Диагенетическое преобразование органо-минеральных сапропелей озера Большие Тороки (Западная Сибирь) // Геология и минеральные сырьевые ресурсы Сибири. — 2014. — № 3 (19). — С. 65–75.
3. **Мальцев А.Е.**, Лазарева Е.В., Леонова Г.А., Бобров В.А., Мирошниченко Л.В. Минеральный состав и геохимия голоценового разреза сапропеля озера Минзелинское (Новосибирская область) // Геология и минеральные сырьевые ресурсы Сибири. — 2014. — № 3с. — Ч.2. — С. 118–122.
4. **Мальцев А.Е.**, Богуш А.А., Леонова Г.А. Особенности химического состава поровых вод голоценового разреза сапропеля оз. Духовое (Южное Прибайкалье) // Химия в интересах устойчивого развития. — 2014. — Т. 22. — № 5. — С. 517–534.
5. **Мальцев А.Е.**, Леонова Г.А., Богуш А.А., Булычева Т.М. Эколого-геохимическая оценка степени антропогенного загрязнения экосистем обводненных карьеров г. Новосибирска // Экология промышленного производства. — 2014. — № 2. — С. 44–53.
6. Леонова Г.А., Бобров В.А., Кривоногов С.К., Богуш А.А., Бычинский В.А., **Мальцев А.Е.**, Аношин Г.Н. Биогеохимические особенности формирования сапропеля в бессточных озерах Прибайкалья (на примере озера Очки) // Геология и геофизика. — 2015. — № 5. — С. 949–970.

7. Леонова Г.А., Мальцев А.Е., Меленевский В.Н., Мирошниченко Л.В., Кондратьева Л.М., Бобров В.А. Геохимия диагенеза органогенных осадков на примере малых озер юга Западной Сибири и Прибайкалья // Геохимия. — 2018. № 1 (в печати).

Статьи, опубликованные за рубежом

8. **Maltsev, A.E.**, Leonova G.A., Bogush A.A., Bobrov V.A. Features of chemical element distribution in pore waters and sapropel in the Dukhovoe Lake as reflection of the processes of freshwater // Proceeding of the 6th International Siberian Early Career GeoScientists Conference. — Novosibirsk: IGM, IPPG SB RAS NSU, 2012. — P. 197–198.

9. Bogush A.A., Leonova G.A., Krivonogov S.K., Bobrov V.A., Tikhova V.D., Kondratyeva L.M., Kuzmina A.E., **Maltsev A.E.** Diagenetic transformation of sapropel from Lake Dukhovoe (East Baikal region, Russia) // Procedia Earth and Planetary Science. — 2013. — N 7. — P. 81–84.

10. **Maltsev A.E.**, Leonova G.A., Krivonogov S.K., Bobrov V.A. Biogeochemistry of the Big Toroki sapropel lake, Western Siberia // Mineralogical Magazine. Goldschmidt 2013. Florence. Italy. 2013. — V. 77. — N 5 — P. 1678.

11. Leonova G.A., Bobrov V.A., Krivonogov S.K., Bogush A.A., **Maltsev A.E.**, Anoshin G.N. Biogeochemical types of lake sapropels in Siberia // Mineralogical Magazine. Goldschmidt 2013. Florence. Italy. 2013. — V. 77. — N 5 — P. 1587.

12. Melenevsky V.N., Leonova G.A., Bobrov V.A., Konyshev A.S., **Maltsev A.E.** Investigation of the processes of organic matter diagenesis in sediments of lake Beloe, West Siberia, by the pyrolytic methods // Mineralogical Magazine. Goldschmidt 2013. Florence. Italy. 2013. — V. 77. — N 5 — P. 1735.

13. **Maltsev A.**, Leonova G., Bobrov V., Krivonogov S., Miroshnichenko L. Manganese in pore waters of calcium carbonate and Ca-carbonate free sapropels of Siberian small lakes in relation to the sediment early diagenesis // Earth surface processes and environmental changes in mountains and adjacent areas of Eastern Eurasia: Abstract Volume 1 for the Main Session at the 14th International Workshop on Present Earth Surface Processes and Long-term Environmental Changes in East Eurasia. — Novosibirsk: Novosibirsk State University, 2017. — P. 55–57.

14. Leonova G.A., **Maltsev A.E.**, Kopoteva T.A., Kondratieva L.M., Krivonogov S.K., Melenevskii V.N., Bobrov V.A. Determination of sources, origin and microbial transformation of modern and fossil organic matter in small lakes of the southern Western Siberia and Transbaikalia // Abstract 14th International Workshop on Present 'Earth surface processes and environmental changes in mountains and adjacent areas of Eastern Eurasia'. Novosibirsk: Novosibirsk State University, 2017. Vol. 1. P. 48–50.

Публикации в иных изданиях (материалы конференций)

15. **Мальцев А.Е.**, Леонова Г.А., Богуш А.А., Бобров В.А. Особенности химического состава поровых вод из керна донных отложений оз. Духовое (Южное Прибайкалье) // Материалы XIX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии «Геология морей и океанов». — Москва: Изд-во ГЕОС, 2011. — Т. IV. — С. 105–109.

16. **Мальцев А.Е.**, Бобров В.А., Леонова Г.А., Кривоногов С.К. Биогеохимическая характеристика сапропеля озера Большие Тороки (Западная Сибирь) // Материалы Международной молодежной школы-семинара «Геохимия живого вещества». — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. — С. 153–156.

17. **Мальцев А.Е.**, Леонова Г.А., Кондратьева Л.М., Бобров В.А., Кривоногов С.К. Геохимия голоценового разреза сапропеля озера Минзелинское // Материалы XX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии «Геология морей и океанов». — Москва: Изд-во ГЕОС, 2013. — Т. IV. — С. 102–106.

18. Леонова Г.А., **Мальцев А.Е.**, Бобров В.А., Кривоногов С.К., Богуш А.А., Тихова В.Д. Биогеохимические особенности формирования сапропелей с различным генезисом органического вещества — планктонным и макрофитовым (на примере озер Сибирского

региона) // Материалы VII Всероссийского литологического совещания «Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории». — Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2013. — Т. 2. — С. 171–175.

19. Кривоногов С.К., Леонова Г.А., **Мальцев А.Е.**, Бобров В.А. Стратиграфия и возраст сапропелей в озерах юга Западной Сибири // Материалы VII Всероссийского литологического совещания «Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории». — Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2013. — Т. 2. — С. 102–105.

20. Кондратьева Л.М., Леонова Г.А., Андреева Д.В., **Мальцев А.Е.**, Стукова О.Ю. Микробиологические исследования сапропеля озера Минзелинское (Новосибирская область) // Материалы Международной конференции «Экология и геохимическая деятельность микроорганизмов экстремальных местообитаний». — Улан-Удэ: Изд-во Бурятского государственного университета, 2013. — С. 86–88.

21. Леонова Г.А., Климин М.А., Копатева Т.А., **Мальцев А.Е.**, Кривоногов С.К., Бобров В.А. К вопросу о генезисе органического вещества сапропеля озера Очки (Южное Прибайкалье) // Материалы Российского совещания «Геохимия литогенеза». — Сыктывкар: Изд-во ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2014. — С. 124–127.

22. Леонова Г.А., Бобров В.А., Богущ А.А., **Мальцев А.Е.** Сапропели: богатства со дна озер // Наука в России. — 2014. — № 1. — С. 28–35.

23. **Мальцев А.Е.**, Леонова Г.А., Бобров В.А. Геохимия поровых вод донных отложений озера Большие Тороки (Западная Сибирь) // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и гидроэкологии Евразии». — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. — С. 738–742.

24. **Мальцев А.Е.**, Леонова Г.А., Бобров В.А., Мирошниченко Л.В. Минералогическая характеристика карбонатных минеральных осадков озера Иткуль (Западная Сибирь) // Материалы 8-го Всероссийского литологического совещания «Эволюция осадочных процессов в истории Земли». — Москва: Изд-во РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2015. — Т. 1. — С. 114–117.

25. **Мальцев А.Е.**, Леонова Г.А., Мирошниченко Л.В., Бобров В.А., Богущ А.А., Кривоногов С.К. Минеральный состав планктоногенного сапропеля оз. Котокель (Прибайкалье) // Материалы XXI международной научной конференции (Школы) по морской геологии «Геология морей и океанов». — Москва: Изд-во ГЕОС, 2015. — Т. III. — С. 56–59.

26. **Мальцев А.Е.**, Мирошниченко Л.В., Леонова Г.А., Бобров В.А., Богущ А.А. Роль сульфатредуцирующих бактерий в аутигенном минералообразовании на примере голоценового разреза сапропеля оз. Котокель // Материалы минералогического семинара «Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения — 2016)». — Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2016. С.155–156.

27. **Мальцев А.Е.**, Леонова Г.А., Меленевский В.Н., Бобров В.А. Основные закономерности превращения органического вещества в раннем диагенезе современных осадков континентальных водоемов Сибири // Труды Биогеохимической лаборатории «Современные проблемы состояния и эволюции таксонов биосферы». — М.: ГЕОХИ РАН, 2017. — Т. 26. — С. 217–221.

28. **Мальцев А.Е.**, Бобров В.А., Леонова Г.А., Лазарева Е.В., Мирошниченко Л.В. Биогеохимические особенности формирования аутигенных минералов в озерно-болотных системах в процессе раннего диагенеза, на примере верхового Выдринского болота и оз. Очки (Южное Прибайкалье) // Материалы V международного полевого симпозиума «Западно-Сибирские торфяники и цикл углерода: прошлое и настоящее», Ханты-Мансийск, 2017 г. — Томск: Издательский дом ТГУ, 2017. — С. 158–160.