Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



Малов Георгий Игоревич

ДЕПОНИРОВАНИЕ УГЛЕРОДА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В САПРОПЕЛЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ МАЛЫХ ОЗЁР ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В ГОЛОЦЕНЕ

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:

д.г.-м.н., профессор, Страховенко Вера Дмитриевна

Новосибирск, 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
ГЛАВА 1 ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ 18
1.1 Геолого-геоморфологический очерк 18
1.2 Типы седиментогенеза 22
1.3 Характеристики исследуемых озерных систем 23
1.4 Почвы и почвообразующие породы 25
1.5 Вода 27
ГЛАВА 2 МЕТОДЫ 31
2.1 Полевые методы исследования 31
2.2 Аналитические методы исследования 34
2.3 Датирование и скорости осадконакопления 41
2.4 Расчёт объемов донных отложений, запасов захоронённого углерода и скоростей депонирования 44
2.5 Расчёт весового количества потенциальных поллютантов в нативном сапропеле 46
2.6 Статистика 47
ГЛАВА 3 ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ 48
3.1 Литология 48
3.2 Минеральное вещество донных отложений 50
3.3 Органическое вещество донных отложений 60
3.4 Скорости осадконакопления 64
ГЛАВА 4 ДЕПОНИРОВАНИЕ УГЛЕРОДА ДОННЫМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ 67
4.1 Скорости депонирования углерода в донных отложениях 68
4.2 Соотношение карбонатного и органического углерода в донных отложениях озёр 74
4.3 Запасы углерода 76

ГЛАВА 5 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ МАЛЫХ ОЗЁР ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ 88
5.1 Латеральное распределение микроэлементов 89
5.2 Вертикальное распределение микроэлементов 92
5.3 Весовое распределение микроэлементов 96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 103
Список литературы 105
Список сокращений и условных обозначений 117
Сокращения 117
Условные обозначения 119
Единицы измерения 120
Приложения 121

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В соответствии с указом Президента РФ № 812 от 26.10.2023 об утверждении климатической доктрины, Постановлением Правительства РФ №133 от 08.02.2022 «Об утверждении Федеральной научно-технической программы в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений на 2021 - 2030 годы» и с указом Президента РФ № 145 от 28.02.2024 г. «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» остро стоит вопрос о решении ряда значимых вызовов, связанных с климатическими изменениями и антропогенной нагрузкой на окружающую среду.

Одним из наиболее значимых последствий воздействия человека на природную среду является происходящая в планетарном масштабе эмиссия макро- и микроэлементов в окружающую среду (Nriagu, 1989; Kabata-Pendias, 2001). Качественная и количественная характеристики поступления, перераспределения и накопления этих элементов в природе являются одной из фундаментальных проблем экогеохимии, экологии и геохимии седиментогенеза. В круге задач, связанных с этой проблемой, лежит выбор наиболее информативных объектов и систем, которые способны накапливать и длительное время сохранять информацию об изменениях окружающей среды. Такими объектами являются малые озера. Озера и их донные отложения, которые являются конечным звеном аккумуляции в круговороте вещества, обладая стратифицированностью и чувствительностью к изменениям в окружающей среде, являются одними из наиболее перспективных объектов для мониторинга экологического состояния биосферы (Страхов, 1962; Пестрякова, 2016; Субетто, Прыткова, 2016). На данный момент единой классификации донных отложений в России и мире не существует. Многообразие классификаций и типологических характеристик донных отложений

обусловлено разными целями и задачами в исследованиях специалистов из различных направлений науки: геологии, географии, химии, биологии, экологии и др. Для классификации донных отложений в наших исследованиях использована классификация Кордэ В.И. с доработками Страховенко В.Д. (Кордэ, 1969; Страховенко и др., 2014). Детальные исследования состава донных отложений малых озёр научным руководителем диссертанта проводятся с 1992 года (Страховенко и др., 2010, 2014, 2016, 2019, 2020, 2021, 2023). С 2016 года автор данной работы стал принимать активное участие в этих работах. Донные осадки исследуемых озёр представлены сапропелями разных типов и классов.

В диссертационной работе одно из основных направлений исследований посвящено вопросам учета данных о потоках парниковых газов и бюджете углерода в естественных экологических системах, а именно депонированию углерода в донные отложения малых озёр как объектов, в настоящее время не учтённых в общем углеродном пуле России. Полученные новые данные позволяют оценить процессы депонирования углерода в донных отложениях малых озёр юга Западной Сибири и количество уже захоронённого углерода, что, в свою очередь, может помочь в решении проблемы объективной оценки выбросов и поглощения климатически активных веществ, снижении их негативного воздействия на окружающую среду и климат. Другим важным направлением исследования в этой работе является изучение пространственно-временного распределения элементов (потенциальных поллютантов - Cd, Pb, Hg, ^{137}Cs) в донных отложениях малых озёр, которое позволяет решать проблемы мониторинга возрастания антропогенных нагрузок на окружающую среду. Неотъемлемой частью геологоразведочных работ является оценка качества сырья, при которой оценка содержания элементов потенциальных поллютантов (Cd, Pb, Hg) играет решающую роль.

Степень разработанности темы. «Изменение климата является одним из наиболее серьезных вызовов XXI века. Современная наука находит все больше подтверждений тому, что хозяйственная деятельность человека, связанная, прежде всего, с выбросами парниковых газов, все сильнее влияет на климат на фоне его естественной изменчивости. Особую обеспокоенность вызывает беспрецедентно

высокая скорость глобального потепления, происходящего в течение последних десятилетий» (Об утверждении…, 2023). «Основным компонентом выбросов от ископаемого топлива являются углекислый газ, метан и пары воды. Они являются ведущими биогенными химическими агентами, участвующими в круговороте углерода, а также важнейшими парниковыми газами. Стабилизирующим элементом климатической системы Земли, обеспечивающим сток и накопление углерода, является растительность. В основном, это лесные экосистемы планеты. (Швиденко, Щепащенко, 2014)» (Малов и др., 2023). Однако с ростом информации о глобальном круговороте углерода, его хранилищах и источниках появился запрос на изучение объектов окружающей среды, которые ранее не были внесены в общий углеродный баланс планеты. Наиболее малоизученными и малоучтёнными являются континентальные водоемы (Lakes and…, 2009). Как показывают последние исследования, глобальное захоронение органического углерода в отложениях внутренних водоемов может превышать секвестрацию органического углерода на дне океана. При этом внутренние воды более эффективно аккумулируют углерод, чем океаны, поскольку в них более высокая доля оседающего органического углерода не подвергается минерализации, а захоранивается в отложениях (The role…, 2016; A large…, 2004; Kastowski et al., 2011; Dean, Gorham, 1998). Глобальные оценки захоронения органического углерода во внутренних водах варьируются от 0,2 до 1,6 Пг С в год, но все ещё основаны на ограниченном количестве данных и неравномерно распределены по всему миру (90% данных приходятся на Северную Америку и Европу) (Dean, Gorham, 1998; Lakes and…, 2009; Organic carbon…, 2017; Mulholland, Elwood, 1982; Hinderer, Einsele, 2001).

Территория Западной Сибири обладает самым большим болотом (Васюганским) в мире, и, как следствие, преобладающими экосистемами, депонирующими углерод, являются озёрные и болотные экосистемы. Вопрос об углеродном учете данной территории остро стоит для российской науки.

Многочисленными исследованиями российских и зарубежных ученых показано, что почти все промышленные производства и деятельность человека

приводят к антропогенному рассеиванию элементов в окружающей среде. Особую тревогу вызывает обогащение биосферы такими элементами, как техногенные радионуклиды, ртуть, кадмий, свинец, в силу их особой токсичности для живых организмов.

Цель работы: изучение пространственно-временного распределения элементов потенциальных поллютантов (Cd, Pb, Hg, ^{137}Cs) и оценка депонирования углерода в сапропелевых залежах различного вещественного состава на юге Западной Сибири.

Достижение цели работы требовало решения следующих задач:

Задачи:

1. Определить уровень содержания и характер распределения макро- и микроэлементов в стратифицированных разрезах донных отложений малых озёр юга Западной Сибири.

2. Оценить скорости осадконакопления в исследуемых озёрах, применив метод, основанный на изучении распределения активности ^{210}Pb и ^{137}Cs по стратифицированным горизонтам осадка. Оценить суммарный уровень загрязнения донных осадков исследуемых озёр радионуклидом ^{137}Cs, являющимся индикатором радиоактивных выпадений, начавшихся в 1945 г. Провести синхронные геохимические измерения ^{137}Cs, ^{210}Pb и других элементов в современный период в донных отложений озёр с разной интенсивностью антропогенной нагрузки и определить направленность изменений химического состава.

3. Определить содержание углерода в донных отложениях изучаемых озёр. Определить формы поступления и захоронения углерода в донном осадке. Сопоставив с данными по скоростям осадконакопления, рассчитать скорости депонирования углерода в донных отложениях. На примере модельных озёр провести детальное исследование с подсчётом запасов углерода в донных отложениях. Используя архивные данные по месторождениям сапропеля Новосибирской области, рассчитать запасы захоронённого в них углерода.

4. Сопоставить полученные аналитические данные с факторами, определяющими седиментогенез (геологическими особенностями водосборной территории, морфологией озерной котловины, химическим, биологическим и гидрологическим режимом водоема и динамикой вод и т.д.) для определения вклада локальных и региональных факторов в формирование донных отложений юга Западной Сибири.

Объектом исследования являются малые озёра юга Западной Сибири.

Предметом исследования являются компоненты исследуемых озёрных систем (вода, донные отложения, почвы водосборов, гидробиота).

Фактический материал. Работа базируется на результатах исследований, которые автор совместно с сотрудниками ИГМ СО РАН, ИВЭП СО РАН, ИК СО РАН, ИПА СО РАН выполнял в период с 2016 по 2024 гг. За это время проведено 7 комплексных экспедиций на территории Барабинской равнины, высокогорья и среднегорья Русского Алтая, Васюганской и Кулундинской равнин. В работе используются данные по 163 озёрам, модельными выбрано 41 озеро (10 озёр, расположенных в условиях аридного типа седиментогенеза, 7 озёр - в условиях нивального типа седиментогенеза и 24 - в условиях гумидного типа седиментогенеза). Отобрано 1345 проб донных отложений, 425 проб воды, биоты – 385, почв и почвообразующего субстрата – 253.

Научная новизна. На данный момент автор и его научный руководитель располагают самой большой базой данных по аналитическим характеристикам сапропелевых залежей юга Западной Сибири, полученным нами в ходе исследований более чем за 20 лет. В результате диссертационной работы получены статистически значимые в региональном масштабе результаты в вопросах депонирования углерода и пространственно-временного распределения элементов потенциальных поллютантов в донных отложениях. Впервые произведена оценка скоростей депонирования углерода для озёр юга Западной Сибири и запасов углерода в сапропелевых месторождениях Новосибирской области. Впервые рассчитаны скорости современного осадконакопления для озёр таежной зоны юга Западной Сибири и горного ландшафта Русского Алтая, проведен сравнительный

анализ полученных данных с данными предыдущих наших исследований по скоростям осадконакопления малых озёр в лесостепном и степном ландшафтах юга Западной Сибири. Проведена количественная оценка объёмов накопления элементов потенциальных поллютантов для сапропелевых отложений малых озёр юга Западной Сибири за последние 200 лет.

Практическое значение. В ходе выполнения диссертационной работы при активном участии диссертанта открыты три новых месторождения сапропеля Новосибирской области, по ним проведены геологоразведочные работы, выполнены подсчёт и защита запасов. На одном из месторождений организованы и уже начаты промышленная добыча сапропеля и производство продуктов глубокой переработки сапропеля. Запасы сапропеля на территории России оцениваются более чем в 100 млрд тонн. Сапропель является уникальным природным сырьем, чистый сапропель и продукты его переработки используются в различных отраслях экономики, начиная от сельского хозяйства и заканчивая медициной. Неотъемлемой частью геологоразведочных работ является оценка качества сырья, при которой оценка содержания элементов потенциальных поллютантов (Cd, Pb, Hg, радиоцезия) играет решающую роль.

Методология и методы исследования. Перед проведением отбора кернов донных отложений изучение рельефа дна озёрной котловины и строения донных отложений озёр проводится эхолотом. Опробование производится в наиболее репрезентативных местах (наибольший разрез донных отложений, удалённость от антропогенных объектов). Количество точек опробования определяется сложностью строения озёрной котловины и сапропелевой залежи.

Для модельных озёр проведено детальное исследование сапропелевой залежи. «Работы проводились по методикам геологоразведочных работ на сапропель с составлением сетей опробования (1 точка на 12 га) и зондирования (1 точка на 1,6 га). Пробоотбор производится непрерывным керном на всю глубину донных отложений при помощи цилиндрического пробоотборника с вакуумным затвором конструкции НПО "Тайфун", Россия. Конструкция пробоотборника позволяет проводить опробование с верхней границы (донные отложения - вода),

не нарушая стратификации отложений и попадания постороннего материала. Разбор керна донных отложений проходил на месте, в катамаране в чистые полиэтиленовые пакеты» (Малов и др., 2023).

Пробоотбор водных проб производится по стандартным методикам ГОСТ (ГОСТ 31861–2012, 2013). Переменные физико-химические показатели в воде (pH, Eh, взвешенное вещество, удельная электропроводность (УЭП), содержание кислорода) измеряются на месте.

«Для оценки почвенно-геохимических особенностей водосборной площади озёр почвенные профили закладываются по катене, охватывающие основные геоморфологические элементы (пойма, озерная терраса, водораздел озерной котловины) и производится отбор проб почвенных разрезов с определением почвенных горизонтов» (Страховенко и др., 2022).

«Биологический состав сапропеля определён коллегами из ИВЭП СО РАН (Ермолаева Н.И., Зарубина Е.Ю.) с помощью поставленных экспериментов с седиментационными ловушками с целью определения качественного состава осаждающейся озерной взвеси и количественных параметров (потоки вещества на единицу площади дна). Отбираются образцы доминирующих видов растений на микроэлементы» (Малов и др., 2023).

Аналитические исследования проводятся в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, г. Новосибирск: для определения макро- и микроэлементного состава проб используются атомно-абсорбционный метод, масс-спектрометрия. Морфология, минеральный, фазовый и химический состав донных отложений анализировались при помощи сканирующего электронного микроскопа и методом рентгеновской дифрактометрии. Активности ^{210}Pb и ^{137}Cs определяются по данным гамма-спектрометрии. Скорости осадконакопления оцениваются методами радиометрического датирования с использованием атмосферного ^{210}Pb по модели постоянного потока (CRS) с проверкой пиками активности ^{137}Cs по маркирующим горизонтам. Элементный состав органической части донных отложений изучается органическим элементным анализом Прегла-Думасана в ИПА СО РАН и ФИЦ ИК СО РАН.

По данным состава донных отложений, почв водосбора и преобладающей растительности определяются формы поступления и захоронения углерода в донных отложениях. По данным скоростей осадконакопления в исследуемых озёрах проводится оценка объемов захоронённого донного осадка в год и массы захороненного углерода на 1 га площади озера. Исходя из полученных данных по скоростям депонирования углерода и составу донных отложений, отбираются модельные объекты и проводятся детальные исследования с подсчётом запасов углерода в донных отложениях. На основе архивных данных, в том числе и по всем месторождениям сапропеля Новосибирской области, которые не обсуждаются в этой работе, рассчитываются запасы захоронённого в них углерода.

Проведение синхронных геохимических сопоставлений ^{137}Cs, ^{210}Pb и элементов потенциальных поллютантов (Cd, Pb, Hg) вертикальной и латеральной направленности в донных отложениях озёр позволяет оценить интенсивность антропогенной нагрузки и определить направленность изменений химического состава. С учётом скоростей осадконакопления можно количественно оценить объёмы накопления элементов потенциальных поллютантов в донных отложениях изученных озёр.

Сопоставление полученных результатов с факторами, определяющими седиментогенез (геологическими особенностями водосборной территории, морфологией озерной котловины, химическим, биологическим и гидрологическим режимом водоема и динамикой вод и т.д.) позволило определить вклад локальных и региональных факторов в формирование донных отложений озёр юга Западной Сибири.

Положения, выносимые на защиту:

1) На территории отдельного региона, в разных ландшафтных зонах юга Западной Сибири скорость седиментации от озера к озеру варьирует от 0,8 до 6,4 мм/год как внутри компактно расположенных озёр, так и между озерами из разных ландшафтных зон и не зависит от состава донных отложений и типа седиментогенеза (гумидного, аридного и нивального).

2) Общий объем секвестрации углерода в донных отложениях малых озёр юга Западной Сибири различается как в региональном, так и в локальном пространственном масштабе, и варьирует от 0,6 до 11,2 т/га в год, независимо от типа седиментогенеза. Основные факторы, определяющие объем секвестрации углерода: скорость осадконакопления, соотношение процессов продукции и деструкции органического вещества, процессы аутигенного минералообразования.
3) Установлено, что абсолютная масса Cd, Hg, Pb в 1 $м^3$ естественно-влажного сапропеля в нижних слоях, формирующихся в условиях разных типов седиментогенеза, выше, чем в верхних, даже при более низкой концентрации в сухом веществе. На фоне общих мировых тенденций увеличения весовых концентраций Cd, Hg, Pb в окружающей среде не выявлено ухудшения качества сапропеля как полезного ископаемого.

Апробация результатов и публикации. Полученные результаты опубликованы в 13 статьях, входящих в международные реферативные базы данных ВАК, Web of Science и Scopus, 10 материалах конференций. Результаты исследований представлены в виде устных и стендовых докладов на 9 международных и всероссийских конференциях. Полученные данные защищены в виде 3 отчётов по подсчёту запасов на месторождениях сапропеля (оз. Песчаное, оз. Нижнее, оз. Качкульня).

Список публикаций:

Статьи:

Малов Г. И., Страховенко В.Д., Овдина Е.А., Малов В.И. Оценка скоростей депонирования углерода донными отложениями малых озер юга Западной Сибири // Записки Горного института. 2026. Том 280. С. 3-15.

Малов Г. И., Страховенко В. Д., Овдина Е. А. Пространственные закономерности накопления углерода в оз. Песчаное (юго-западной Сибири) в голоцене // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2023. – № 3(55). – С. 70–77. – DOI: 10.20403/2078-0575-2023-3-70-77.

Malov G. I., Ovdina E. A., Strakhovenko V. D. Quantitative assessment of carbon sequestration by sapropel deposits inferred from Lakes Peschanoe and Nizhnee (Western Siberia, Russia) // Limnology and Freshwater Biology. – 2022. – No. 4. – P. 1482–1484. – DOI: 10.31951/2658-3518-2022-A-4-1482.

Страховенко В. Д., Малов Г. И., Овдина Е. А., Малов В. И. Первые данные об изотопном составе серы верхнего современного слоя осадков малых озер юга Западной Сибири // Литосфера. – 2026. – Т. 26, № 5. – С. 1042–1060. – DOI: 10.24930/2500-302X-2026-26-5-1042-1060.

Страховенко В. Д., Малов Г. И., Овдина Е. А., Малов В. И. // Распределение элементов в до- и постиндустриальные периоды их накопления в донных осадках малых озер юга Сибири, сформировавшихся в условиях гумидного и аридного типов седиментогенеза Литология и полезные ископаемые. – 2026. – принята к печати.

Страховенко В. Д., Малов Г. И., Овдина Е. А., Малов В. И. Минеральный состав и условия формирования донных отложений малых озер плато Укок (Горный Алтай) // Геоморфология и палеогеография. – 2023а. – Т. 54. – № 4. – С. 207–225. – DOI: 10.31857/S29491789230401382.

Страховенко В. Д., Овдина Е. А., Малов В. И., Малов Г. И. Уровни концентрации химических элементов, вариации минерального состава и современная скорость осадконакопления в сапропелевых залежах малых озер зоны тайги юга Сибири // Геология и геофизика. – 2023б. – Т. 64. – № 7. – С. 991–1007. – DOI: 10.15372/GiG2023101.

Страховенко В. Д., Овдина Е. А., Маликова И. Н., Малов Г. И. Радиационная оценка сапропелевых отложений малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины (Западная Сибирь) // Геохимия. – 2022а. – Т. 67. – № 8. – С. 787–804. – DOI: 10.31857/S0016752522080088.

Страховенко В. Д., Овдина Е. А., Малов Г. И. Особенности распределения урана в компонентах озерных систем, расположенных в степном ландшафте юга Сибири (Кулундинская и Тажеранская степь) // Геология и

минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2022б. – № 2(50). – С. 88–99. – DOI: 10.20403/2078-0575-2022-2-88-99.

Strakhovenko V. D., Malov V. I., Malov G. I., Ovdina E. A. Spatio-temporal distribution of gross mercury contents in the bottom sediments of small lakes of the taiga zone // Limnology and Freshwater Biology. – 2022. – No. 3. – P. 1262–1265. – DOI: 10.31951/2658-3518-2022-A-3-1262.

Strakhovenko V., Ovdina E., Malov G. [et al.]. Concentration levels and features of the distribution of trace elements in the sapropel deposits of small lakes (South of Western Siberia) // Minerals. – 2021. – Vol. 11. – No. 11. – Art. 1210. – DOI: 10.3390/min11111210.

Страховенко В. Д., Овдина Е. А., Малов Г. И. [и др.]. Генезис органоминеральных отложений озер центральной части Барабинской низменности (юг Западной Сибири) // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60. – № 9. – С. 1231–1243. – DOI: 10.15372/GiG2019093.

Strakhovenko V., Ovdina E., Malov G. The carbon isotopes ratio in small lakes bottom sediments located in the forest-steppe and steppe zones of southern Siberia // E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 98. – Art. 12021. – DOI: 10.1051/e3sconf/20199812021.

Тезисы:

Малов Г. И., Страховенко В. Д., Овдина Е. А., Малов В. И. Скорости осадконакопления донных отложений малых озёр Улаганской долины и Укокского плоскогорья (Горный Алтай) // Геология морей и океанов : материалы XXV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. – М.: ИО РАН, 2023. – Т. IV. – С. 226–231. – DOI: 10.29006/978-5-6051054-3-5-2023.

Малов Г. И., Страховенко В. Д., Овдина Е. А., Малов В. И. Оценка депонирования углерода в органоминеральных донных отложениях малых озёр Улаганской долины и Укокского плоскогорья (Горный Алтай) // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами : труды V Всероссийской научной конференции с международным участием имени профессора С. Л.

Шварцева / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2023. – С. 198–201.

Малов Г. И., Страховенко В. Д., Овдина Е. А., Малов В. И. О проблемах геологоразведочных работ на сапропель // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии : материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием. – Барнаул, 2022. – С. 274-278.

Malov G. I., Strakhovenko V. D., Ovdina E. A. Conditions for the formation of lakes Peschanoe and Nizhnee (Baraba Lowland) // X International Siberian Early Career GeoScientists Conference : proceedings of the conference, Novosibirsk, 13–17 June 2022. – Novosibirsk: Novosibirsk State University, 2022. – P. 173–174.

Малов Г. И., Страховенко В. Д., Овдина Е. А. Радиоэкологическая оценка органоминеральных донных отложений озёр Обь-Чулымского междуречья (Васюганье) // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека : материалы VI Международной конференции: в 2 т. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2021. – С. 335–340.

Малов Г. И., Страховенко В. Д., Овдина Е. А. Минералого-геохимическая характеристика озерной системы «Бирюзовое» (Горный Алтай) // Геология морей и океанов : материалы XXIV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. – М.: ИО РАН, 2021. – Т. II. – С. 113.

Малов Г. И., Овдина Е. А., Феттер Г. В. Радиационная оценка сапропелевых отложений малых озер таёжной зоны Юга Западной Сибири // Проблемы геологии и освоения недр : труды XXIV Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 75-летию Победы в Великой Отечественной войне, Томск, 06–10 апреля 2020 г. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2020. – С. 608–609.

Страховенко В. Д., Малов Г. И., Овдина Е. А. [и др.]. Актуальные проблемы сохранения и использования сапропелевых залежей малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины // Озера Евразии: проблемы и

пути их решения : материалы II Международной конференции, Казань, 19–24 мая 2019 г. – Казань: Академия наук Республики Татарстан, 2019. – Ч. 2. – С. 184–189.

Страховенко В. Д., Малов Г. И., Овдина Е. А., Малов В. И. Аутигенное минералообразование в донных отложениях высоко- и среднегорных озерах Алтая в условиях нивального седиментогенеза // Герценовские чтения. География: развитие науки и образования: материалы Международной научно-практической конференции: в 2 т. / отв. ред. Д. А. Субетто, А. Н. Паранина. – Санкт-Петербург: Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, 2023. – Т. I. – С. 166–171.

Страховенко В. Д., Белкина Н. А., Субетто Д. А. [и др.]. Уровни концентраций элементов и современные скорости осадконакопления в сапропелевых залежах малых озер таежной зоны, территориально расположенных в разных районах Сибири и на юго-восточной окраине Балтийского щита // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии : материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием, Барнаул, 29 августа – 03 сентября 2022 г. – Барнаул: ООО «Пять плюс», 2022. – Т. 2. – С. 140–148.

Приказы о защите запасов на месторождениях:

Приказ МПРиЭ НСО № 1526 от 30.12.2021 г.

Приказ МПРиЭ НСО № 1480 от 23.12.2020 г.

Приказ МПРиЭ НСО № 790 от 22.07.2021 г.

Связь работы с научными программами и научно-исследовательскими темами. Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН (FWZN-2026-0008) при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Исследования выполнялись в ходе работы по грантам РФФИ 16-05-00132 «Процессы современного седиментогенеза в малых озерах Сибири», 18-45-540002 р_а «Вещественный состав, генезис и рациональное природопользование сапропелевых залежей малых озер Барабинской низменности» и РНФ 23-27-00111 «Седиментогенез в малых озерах горной

системы Алтая: процессы накопления и трансформации донных отложений в условиях нивального типа».

Личный вклад автора. Автором принято непосредственное участие в экспедиционных работах, которые включали отбор проб донных отложений, вод, почв, почвообразующего субстрата, биоты. Автором проведена дальнейшая пробоподготовка для аналитических методов исследования. Автор самостоятельно изучал материалы на сканирующем электронном микроскопе. Автор принимал активное участие в обработке полученных аналитических данных, интерпретации и сопоставлении новых данных с литературными материалами, подготовке и публикации результатов в научных журналах.

Структура и объем работы. Текст работы представлен на 126 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, включающего 120 наименований, списка сокращений и условных обозначений и 3 приложений. Работа включает 14 таблиц, 38 рисунков.

Благодарности.

Автор выражает глубокую признательность за руководство и поддержку в ходе выполнения исследования своему научному руководителю профессору, доктору геолого-минералогических наук Вере Дмитриевне Страховенко.

Автор выражает признательность и благодарность преподавателям и сотрудникам Геолого-геофизического факультета Новосибирского государственного университета.

Отдельно автор выражает благодарность следующим людям: Овдиной Е.А., Фаусту Ю.Д., Лазаревой Е.В., Букреевой Л.Н., Лудиной Г.С., Ивановой Л.Д., Мичуриной Л.П., Савиной О.А., Бадмаевой Ж.О., Маликову Ю.И., Густайтис М.А., Мягкой И.Н., Айриянц Е. В., Киселевой О. Н., Белянину Д. К., Жмодику С.М., Мельгунову М.С., Малову В.И.

ГЛАВА 1 ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Геолого-геоморфологический очерк

Озёра являются уникальными объектами изучения благодаря многофакторности процессов, происходящих в них. При этом особый интерес направлен на малые континентальные озёра, которые являются локальными конечными объектами аккумуляции, которые служат своеобразными маркерами природных и антропогенных процессов (Солотчина, 2009; Пестрякова, 2016; Субетто, Прыткова, 2016).

Исследуемые озера локализованы на юге Западной Сибири (Рис. 1.1), в основном, в юго-восточной части Западно-Сибирской платформы, граничащей с Алтае-Саянской складчатой областью, в пределах Обь-Иртышского междуречья, и часть озёр расположена на территории Горного Алтая (плато Укок, Улаганская долина).

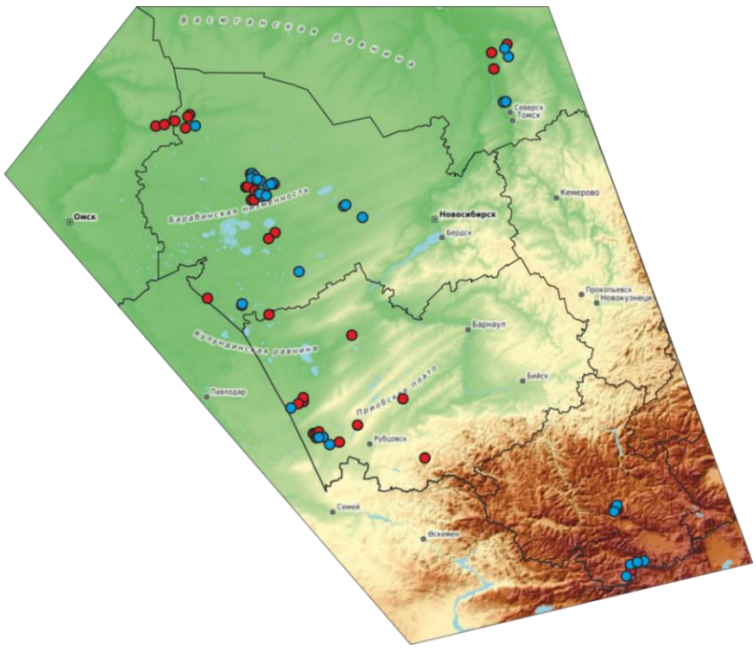


Рисунок 1.1 — Схема расположения исследуемых озёр: Синий круг – выбранные модельные объекты; Красный круг – исследуемые озёра. (Высотная основа SRTMGL30 v002 NASA/LP DAAC, 2013).

На равнинной части исследуемой территории «проявлена природно-климатическая зональность. С севера на юг здесь размещены: бореальная Васюганская таежно-болотная плоская равнина, суббореальные Барабинская равнинная лесостепь, сменяющаяся Кулундинской степной низменной равниной». «На крайнем юго-западе Кулундинской степи выделяется сухостепная зона» (Государственная…, 2014). Юго-восточнее, с увеличением высот, на территории Горного Алтая широтная зональность сменяется на высотную (Рис. 1.2).

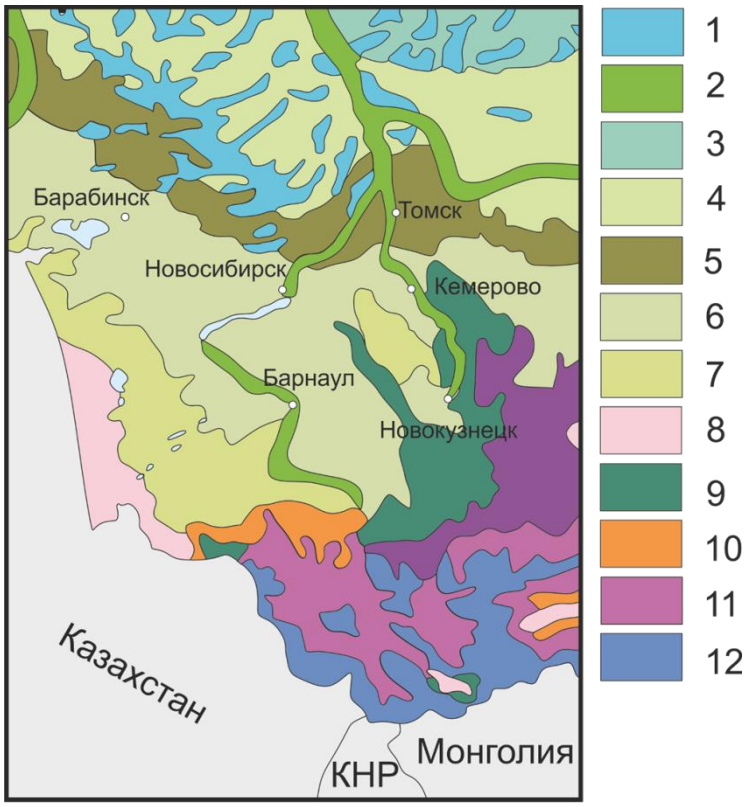


Рисунок 1.2 — Схема ландшафтов изучаемой территории I – Подтаёжный западносибирский ландшафт, II – Лесостепной западносибирский ландшафт, III – Степной типичный западносибирский ландшафт, IV – Пояс низкогорных степей, V – Среднегорный пояс лиственничных и кедрово-лиственничных лесов,
VI – Высокогорный гольцовый пояс (Национальный…, 2007).

«Поверхностные отложения исследуемой территории Западно-Сибирской платформы представлены суглинками и глинами, в некоторых случаях песками, формировавшимися за счет денудации палеозойских формаций Алтае-Саяна и Казахстана» (Объяснительная…, 1967).

«В неоген-четвертичное время равнинные площади испытывают погружение с различной скоростью: Васюганская, Приобская, Кулундинская и Барабинская,

что приводит к замкнутости и бессточности последней, достигшей абсолютных отметок на уровне 100–120 м» (Объяснительная…, 1967). «На данных территориях междуречье располагаются три крупных озерных района, представляющих собой бессточные котловины: Чано-Барабинский, Карасукский и Кулундинский. Многочисленные озера различны по размерам, но обычно площадь их акватории не превышает 1 км2, а глубина чаще всего составляет не более 2–3 м. По происхождению озера делятся на остаточные древнеозерных равнин, старичные, просадочного происхождения и озера древних ложбин стока» (Государственная…, 2014). За счёт замкнутости региона и постоянного переотложения уже накопленных осадков формируются хорошо гомогенизированные отложения с наследованием как минерального, так и химического состава.

Алтайские озёра расположены в среднегорных и высокогорных районах Русского Алтая в Улаганской долине и на плато Укок соответственно. «Изучаемая группа озер Укокского плоскогорья располагается на территории современного горно-ледникового центра, который представлен крупнейшими ледниками Сибири. Плоскогорье Укок образовано двумя котловинами – Бертекской и Тархатинской. По морфологическим и морфометрическим признакам в Бертекской котловине выделяют две впадины: восточную — Калгутинскую и западную — Акалахинскую. Днище Калгутинской впадины относительно выровненное, слабо заболоченное, с незначительным развитием термокарстового микрорельефа (где и располагаются озера) (Михайлов, 1994; Укок (прошлое)…, 2000; Новейшие данные…, 2017). Согласно данным гидрометео службы, среднегодовое количество осадков на изучаемой территории колеблется в пределах 160—290 мм/год, причём их большая часть (до 80 %) выпадает на лето, а среднегодовая температура колеблется от -7,6 до -9,5˚С) (Криогенез…, 2006). Днище котловин усеяны множеством озер разного размера двух основных типов— термокарстовые и моренно-подпрудные» (Страховенко и др., 2023). «Котловины почти полностью выполнены моренными образованиями: самые нижние из которых имеют позднеоплейстоценовый возраст, а самые верхние морены современных ледников» (Государственная…, 2011; Новейшие данные…, 2017).

«На плоскогорье Укок горные породы представлены разновозрастными отложениями палеозойской, мезозойской и кайнозойской эр. Отложения четвертичного периода представлены всеми генетическими типами ледниковых, водно-ледниковых, склоновых, аллювиальных, озерно-аллювиальных, ледниково-озерных и болотных осадков. Большие площади на плоскогорье Укок занимают изверженные породы. В геохимическом плане изучаемые озера (перевал Теплый ключ, Каровое, Калгутинское, Аргамджи) находятся в пределах Калгутинской рудно-магматической системы. Калгутинский медно-редкометалльно-молибден-вольфрамовый рудный узел, приурочен к одноименной крупной вулканотектонической структуре, сложенной терригенно-вулканогенными покровными и субвулканическими образованиями трахиандезит дацитриолитового аксайского комплекса» (Геолого-геофизическая…, 2004; Поцелуев и др., 2006; Состав, флюидный…, 2011; Государственная…, 2011).

На территории исследования в результате широтной и высотной зональности осуществляется постепенная смена типов седиментогенеза с гумидного типа (подтайга Васюганской равнины, лесостепь Барабинской равнины) на аридный (Кулундинская низменная равнина, степь и подзона ленточных боров), вплоть до нивального в среднегорных и высокогорных районах Алтая.

Как показали исследования научного коллектива, в который входит автор, для озёр юга Западной Сибири (Генезис органоминеральных…, 2019) решающую роль в сапропелеобразовании играют локальные факторы - видовой состав биоты, тип зарастания, гидрологический режим, гидрохимические особенности, локальные геоморфологические условия и др. При этом эти факторы могут меняться как параллельно друг другу, так и совершенно независимо, создавая все новые сочетания и изменяя степень своего воздействия на тот или иной компонент озерной системы. Детально этот вопрос рассмотрен в диссертационной работе Овдиной Е.А. (Овдина, 2021).

1.2 Типы седиментогенеза

Климатические факторы играют ключевую роль в формировании, структуре и динамике осадконакопления в различных географических зонах. В частности, климат определяет объем и характер поступающего материала, его физико-химические свойства, а также интенсивность и продолжительность процессов транспортировки и аккумуляции. В контексте малых озёр влияние климата проявляется особенно сильно. Климат оказывает фундаментальное воздействие на все стадии седиментогенеза: от генерации осадочного материала на водосборной территории до его перемещения и конечной аккумуляции в озёрной котловине. Изменения климатических параметров — таких как температура, осадки, длительность снежного покрова, испарение и повторяемость погодных событий — задают специфические режимы осадконакопления в разных ландшафтно-климатических условиях.

Выделение типов седиментогенеза представляет собой важную задачу в рамках литогенетического и палеогеографического анализа осадочных бассейнов. Это направление базируется на комплексной оценке климато-ландшафтных условий, источников вещества, гидрологического режима, биологической продуктивности и состава донных отложений. Научная разработка методологических подходов к классификации таких типов берёт начало в работах Н.М. Страхова и широко применяется по всему миру (Страхов, 1962).

Первый и наиболее широко применяемый подход основывается на пересечении ландшафтной и климатической зональности. По данным ландшафтных карт и климатических классификаций, выделяются зоны с устойчивыми климато-географическими признаками:

1. зоны избыточного увлажнения (гумидные),
2. зоны недостаточного увлажнения (аридные),
3. зоны преобладания снегового и ледникового питания (нивальные).

Это позволяет предполагать доминирующий тип седиментогенеза на основе пространственного положения водоема (Субетто, Прыткова, 2016). Но, как

показали работы Страховенко В.Д., решающую роль при процессах осадконакопления в малых озёрах также могут играть и локальные факторы (видовой состав биоты, состав почв и субстрата, гидрохимические условия), вследствие чего необходимо уточнение и других параметров. Наиболее продуктивным является комплексный подход, сочетающий географические, геохимические, гидрологические и литологические данные. Такой подход особенно актуален при исследовании малых озёр с высокой чувствительностью к локальному климату.

Территория юга Западной Сибири представляет собой уникальный регион для изучения различных типов седиментогенеза, поскольку на сравнительно ограниченном пространстве сочетаются различные ландшафтно-климатические зоны, что даёт возможность на конкретных примерах охарактеризовать проявления разных типов седиментации в малых озёрных системах.

Исследуемые озёра с учётом локальных факторов распределены по следующим регионам:

Васюганская равнина — гумидный тип седиментогенеза;

Барабинская равнина и Кулундинская степь — постепенный переход от гумидного к аридному типу седиментогенеза;

Улаганская долина и плоскогорье Укок (Русский Алтай) — нивальный тип седиментогенеза в горном ландшафте.

1.3 Характеристики исследуемых озерных систем

Озёра являются комплексным объектом исследования, интерес к которому проявляют многие исследователи из разных научных направлений: географы, геоморфологи, биологи, экологи, геологи и др. Классифицирование озер является сложной фундаментальной теоретической проблемой. Более трёхсот лет изучаются озёра и делаются попытки распределить озера на группы, классы и подклассы в зависимости от их сходства или различия (Мякишева, 2009). В преобладающем большинстве случаев классификации, предложенные учёными-озёроведами, являются одномерными и частными. Одномерными - потому что основываются на

одном наиболее характерном признаке (глубина, площадь, баланс водообмена и пр.), при этом всегда остаётся вопрос, какой из признаков считать главным. Частными - потому что предложены и применяются для решения только определённых задач.

Поскольку в работе акцент делается на изучение донных отложений, и была необходимость подобрать объекты исследования по общим морфометрическим, гидрологическим, гидрохимическим, трофическим и др. показателям, была выбрана базовая классификация озёр из учебника гидрогеологии Михайлова (Михайлов и др., 2008). Согласно данной классификации по **размеру** выделяют четыре вида озёр. Очень большие − площадью более 1000 км^2, большие – площадью от 101 км^2 до 1000 км^2, средние – площадью от 10 до 100 км^2 и малые – площадью до 10 км^2. В работе используются только малые озёра, обладающие наибольшей чувствительностью к изменениям в процессах осадконакопления и развития озёр. По **степени постоянства** озёра делятся на временные (эфемерные) и на постоянные. Временные озёра охарактеризованы тем, что заполнены водой только во влажные периоды года, а в остальное время они пересыхают. По данной классификации все исследуемые озёра относятся к постоянным. Но с дополнением, что в степных районах с аридным климатом часть исследуемых озёр теряет значительную часть воды в меженный период (Михайлов и др., 2008).

По **географическому положению** озёра делятся на два вида: интразональные и полизональные. Первые находятся в одной географической (ландшафтной) зоне вместе с водосбором этих озёр. В связи с малыми площадями акваторий озёр и водосборов все исследуемые озёра являются интразональными (Михайлов и др., 2008).

По **генезису озёрных котловин** встречается наибольшее разнообразие классификаций**.** Согласно учебнику гидрогеологии Михайлова В.Н., по происхождению котловины озер могут быть: тектонические, вулканические, метеоритные, ледниковые, карстовые, термокарстовые, суффозионные, речные, морские, эоловые, органогенные. Среди изученных озер преобладают суффузионно-просадочные котловины на равнинных частях исследуемых районов

(степной, лесостепной и таёжный ландшафты), которые часто являются наследниками лощинно-гривного рельефа на территории Барабинской низменности и Кулундинской равнины. А в горном ландшафте преобладают озёрные котловины термокарстового и моренно-подпрудного типа с наложенными неотектоническими процессами.

По **характеру водообмена** озёра делят на сточные и бессточные. В моем случае выбирались преимущественно бессточные озёра.

По **минерализации вод** в соответствии с классификацией природных вод Алекина О.А. озёра могут быть: 1) пресные с солёностью менее 1 ‰. 2) солоноватые с солёностью от 1 до 25‰. 3) солёные (соляные) с солёностью от 25 до 50‰. 4) рассолы с солёностью более 50‰. В работе подбирались озёра с широким диапазоном по минерализации и химическому составу, детально составы вод рассмотрены в главе 1.3.

По **условиям питания водных организмов** (трофические условия) озёра классифицируют на олиготрофные, эвтрофные, дистрофные, мезотрофные. В условиях холодного и умеренного климата небольшие по размеру озёра эволюционируют так: олиготрофные → мезотрофные→ эвтрофные→ дистрофные→ болота. Поскольку трофические условия являются одним из важнейших факторов осадконакопления в озёрах, в моём исследовании были подобраны озёра всех трофических условий.

Автор располагает базой данных более 300 озёр, изученных в рамках многолетних исследований коллектива лаб. 218 ИГМ СО РАН. В основу диссертационной работы положены данные наиболее детально изученных озёр (87 шт.) и из них выбрано 41 модельное озеро.

1.4 Почвы и почвообразующие породы

Почвообразующие породы Васюганской равнины, Барабинской равнины и Кулундинской низменной равнины представлены озерно-аллювиальными и субаэральными лессовидными отложениями, преимущественно алевритового гранулометрического состава с разной степенью засоления (Генезис

органоминеральных…, 2019). Для озер Бертекской котловины и Улаганской долины (Русский Алтай) генетически почвообразующие породы представлены моренными и озерно-аллювиальными отложениями с преобладанием кварц-полевошпатового состава. Для наиболее высокогорных озёр (Калгутинская котловина) к почвообразующим породам добавляются коллювиальные отложения, представленные породами Калгутинской рудно-магматической системы (редкометалльным гранитным массивом, дайковым поясом онгонитов и эльванов, крупными редкометалльно-молибден-вольфрамовыми штоками).

Так как «почвообразующий субстрат на водосборных территориях всех исследуемых озер представлены породами, в составе которых резко преобладают кварц и полевые шпаты, то при выветривании высоко натриевых пород воды приобретают содовый состав». «Площади водосбора имеют единые геохимические характеристики по почвам водосборных площадей» (Геохимическая…, 2016; Генезис органоминеральных…, 2019; Страховенко и др., 2022 и др.).

На примере территорий Барабинской равнины и Кулундинской низменной равнины детально рассмотрены почвы и их влияние на формирование донного осадка озёр.

«Структура почвенного покрова в водосборных бассейнах озёр Кулундинской равнины представляет собой концентрическое распределение, сменяющих друг друга, почвенных типов: подзол → дерново-подзол → тёмно-каштановая → лугово-степная → луговая → солончак». «Подзолы формируются на водораздельных участках водосборных бассейнов сапропелевых озёр под сосновыми лишайниковыми лесами, но при появлении в составе древостоя лиственных пород и травянистого покрова начинают развиваться дерново-подзолы. В тех же геоморфологических условиях, но под степными биоценозами почвенный покров представлен тёмно-каштановыми почвами или чернозёмами.» Ближе к озеру влияние почвенно-грунтовых вод становится более ощутимым, что провоцирует образование сначала лугово-степных, а затем и луговых почв. Непосредственно в прибрежной зоне озера формируются солончаки луговые и соровые. «Для территории Барабинской равнины структура почвенного покрова в

водосборных бассейнах озёр так же представляет собой концентрическое распределение, сменяющих друг друга, почвенных типов: болотная → лугово-болотная → луговая → лугово-чернозёмная → чернозём южный или обыкновенный → серая лесная» (Генезис органоминеральных…, 2019).

В «формировании озёрного сапропеля почвенный покров играет роль источника органоминерального материала и водорастворимых солей, которые попадая вместе с поверхностными и почвенно-грунтовыми водами в озеро, аккумулируются на его дне» (Страховенко и др., 2022). «Количество и качество поступающего материала в озеро зависит от содержания в почвенном покрове гумусовых соединений, тонкодисперсных частиц и ионов водорастворимых соединений. Содержание гумусовых соединений в верхней части профиля исследуемых почв колеблется в широких приделах, даже в пределах одного водосборного бассейна, степень их гумусированности меняется от низкой – средней до высокой» (Страховенко и др., 2022).

«Исходный материал почв образовывается, из материала, который, поступал в рыхлые покровные отложения с ветром и водой в виде аллохтонного вещества, перемешиваясь с остатками коренных пород, и далее трансформировался в аллювиальные, делювиальные и лессовидные породы. Вещество в этих условиях поступает в озера в основном во взвешенном состоянии и в резко подчиненном количестве в растворенном состоянии.» Обобщив данные по химическому и минеральному составу почв водосборов, можно утверждать, что они наследуют терригенный минеральный состав почвообразующего субстрата. Понижение содержаний микроэлементов в почвах связано с разубоживанием осадка карбонатами или органическим материалом (Геохимическая…, 2016; Генезис органоминеральных…, 2019; Страховенко и др., 2022 и др.).

1.5 Вода

Общая минерализация и состав вод исследованных озер значительно варьируют в зависимости от изменения региональных факторов (количество

осадков, средняя температура, состав пород и др.) с севера на юг и по изменению высот. На рисунке 1.3 представлены треугольные диаграммы анионного и катионного составов вод исследуемых озёр, разделенных по ландшафтным зонам и общей минерализации.

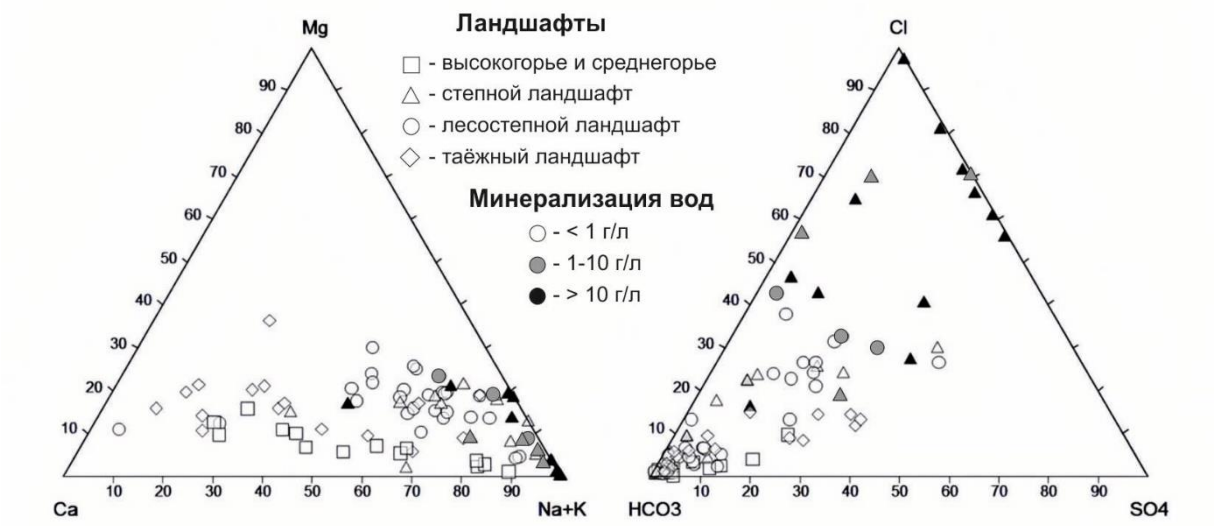


Рисунок 1.3 — Анионный и катионный состав вод исследуемых озёр: квадрат – озёра нивального типа седиментогенеза, треугольник - озёра аридного типа седиментогенеза, круг - озёра гумидного типа седиментогенеза лесостепного ландшафта, ромб - озёра гумидного типа седиментогенеза таёжного ландшафта

Для территории с гумидным типом седиментогенеза (таёжные ландшафты Васюганской равнины) «за счет избытка влаги и миграции легкорастворимых солей и продуктов почвообразования в нижние горизонты почв и зимних галогеохимических процессов, формируются преимущественно пресные гидрокарбонатные воды (рис. 1.3). С вариациями: Ca-Na-Mg - от кальциевых до натриево-магниевых, степени минерализации от ультрапресных - 0,012 г/л до пресных 0, 32 г/л, величины pH от 5,2 до 9,2, содержания растворенного в воде кислорода 5-12 мг/дм3, концентрации органических веществ 4,54 – 8,32 мгО/дм3 (по БПК5)» (Страховенко и др., 2023).

Южнее с уменьшением общей влажности происходит постепенный переход с гумидного типа седиментогенеза (лесостепь Барабинской равнины) на аридный (степи Барабинской равнины и Кулундинской низменной равнины), и вместе с этим

более интенсивное накопление легкорастворимых солей, и, как следствие, изменение состава воды.

По значению общей минерализации воды озёр Барабинской равнины более минерализованные, чем в таёжных ландшафтах, «воды в основном пресные (от 0.2 до 0.6 г/л). Несколько озер (Цыбово, Чистое, Жилое) со значениями общей минерализации от 1 до 3 г/л являются солоноватыми и одно озеро соленое (оз. Песчаное (3.3 г/л)). По содержанию главных ионов, воды в основном гидрокарбонатно-Mg-Na или гидрокарбонатно-Na (Рис.3.1), щелочные, со значениями pH от 8.1 (оз. Бол. Казатово) до 10 (оз. Жилое-К). Показатель Eh воды во всех изученных озерах положительный от 287 мВ (оз. Чистое) до 375 мВ (оз. Казатово). Содержание кислорода достаточно высоко и варьирует от 9.7 мг/л (оз. Камбала) до 6.5 мг/л (оз. Бугристое)» (Генезис органоминеральных…, 2019).

«На территории Кулундинской равнины общая минерализация вод исследуемых озёр изменяется от пресной (0,63 г/л – Оз. Рублёво) до рассольной (89,7 г/л – оз. Малиновое). В преобладающем случае воды солёные – 16,7 г/л, от нейтральных (pH 7,63 – оз. Малиновое) до щелочных (pH 9,83 – оз. Танатар-6). Содержание кислорода имеет диапазон от 5,37 мг/л (оз. Йодное) до 13,3 мг/л (оз. Сартлан)» (Генезис органоминеральных…, 2019). Учёные, работавшие на данной территории, выделяют две противоположные модели изменения состава вод. Одни авторы выявляют взаимосвязь между химическим составом природных вод (грунтовыми, поверхностными), типами почв и генезисом солей в озерах и почвах в Кулундинской степи (Никольская, 1961). «Другие авторы устанавливают отсутствие четких корреляций между географической зональностью и зональностью вод озер Кулундинской степи и утверждают, что генезис солей в озерах определяется главным образом характером подземных вод (Лебедева и др., 2008). Полученные данные по химическому составу вод озер Кулундинской степи показали, что к зонам распространения подзолистых почв, приурочены карбонатные воды, с преобладанием бикарбонатов натрия, в зонах распространения лугово-степных солонцеватых почв — озера с сульфатно-бикарбонатными и сульфатно-хлоридными водами» (Страховенко и др., 2022).

В пределах нивального типа седиментогенеза (высокогорье и среднегорье Алтая) вода исследованных озер характеризуется пресной минерализацией (TDS) от 9 до 283 мг/л. Преобладание бикарбонатного состава сопровождается вариациями катионного состава, особенно по кальцию и натрию (Рис. 1.3). Преобладание на водосборах озер, где расположены гранитные образования, минералов Na-плагиоклаза, таких как альбит и олигоклаз, во многом объясняет натриевый состав некоторых озёрных вод (Страховенко и др., 2023). Кроме того, наличие повышенного содержания сульфат-ионов в озёрах Аргамджи и Бирюзовое можно объяснить гипергенным окислением сульфидов, обнаруженных в рудной минерализации, как отмечается в работах (Государственная…, 2011; Паничев и др., 2022). «Воды озер обладают щелочные с pH от 7,3 до 9,4. Индекс Eh этих вод имеет положительное и высокое значение. При этом концентрация растворенного O2 в воде колеблется в пределах 6,1 – 7,9 мг/л» (Зарубина, Феттер, 2022).

ГЛАВА 2 МЕТОДЫ

2.1 Полевые методы исследования

Экспедиционные работы преимущественно проводились в летнее время, после схода снега, в меженный период. Автор принимал непосредственное участие в экспедиционных работах и был практически на всех исследуемых озёрах. При работе на объектах исследования применялся метод комплексности и каждое озеро исследовалось как отдельная озёрная система (проведён отбор проб донных отложений, воды, почвы, коренных горных пород при их наличии, преобладающей растительности и песков с волноприбойной зоны озера) и в совокупности нескольких озер, компактно расположенных и объединенных единым источником питания вод, площадью водосбора.

Изучение рельефа дна озёрной котловины и строения донных отложений озёр проводилось с помощью эхолота (ECHOMAP plus 62CV) с последующим опробованием в наиболее репрезентативных местах (наибольший разрез донных отложений, удалённость от антропогенных объектов), при сложной структуре озёрной котловины и сапропелевой залежи количество точек увеличивалось.

Для части озёр проведено детальное исследование сапропелевой залежи. «Работы проводились по методикам геологоразведочных работ на сапропель с составлением сетей опробования (1 точка на 12 га) и зондирования (1 точка на 1,6 га) (Инструкция…, 1988). Пробоотбор производится непрерывным керном на всю глубину донных отложений, и проходил при помощи цилиндрического пробоотборника с вакуумным затвором конструкции НПО "Тайфун" (d - 82 мм и L - 120 см). Конструкция пробоотборника позволяет проводить опробование с верхней границы (донный осадок-вода), не нарушая стратификации отложений и

попадания постороннего материала. Разбор керна донных отложений проходил на месте, в катамаране в чистые полиэтиленовые пакеты. В преобладающем ряде случаев опробование керна производилось с шагом 1-5 см. При детальных работах, опробование керна в одной точке озера производилось с шагом 1-5 см, в остальных точках пробоотбора - каждые 50 см. При опробовании визуально определялись и документировались смена цвета, структуры и других свойств сапропеля. В связи с неоднородностью осадка, и ошибок эхолота при прохождении лодки над большим количеством подводной растительности, дополнительно проводилось зондирование с помощью металлических штанг с разметкой, точность зондирования составляла 5 см. Привязка точек опробования и зондирования проводилась с помощью GPS навигатора GARMIN GPSMAP 86S.

Пробоотбор водных проб производился по стандартным ГОСТовским методикам (ГОСТ 31861–2012, 2013)». Для проб на определение макро- и микроэлементного состава использовались пластиковые бутылки объемом 1 л и 0,5 л (с подкислением азотной кислотой) соответственно. Для определения содержания Hg в воде пробоотбор производился в стеклянные бутылки объемом 0,33 л (с подкислением азотной кислотой). Переменные физико-химические показатели в воде (pH, Eh, взвешенное вещество (ВВ), удельная электропроводность (УЭП), содержание O2) измерялись на месте прибором АНИОН-7000 (Биомер, Россия).

«Для оценки почвенно-геохимических особенностей водосборной площади озер были заложены почвенно-геохимические профили, охватывающие основные геоморфологические элементы (пойма, озерная терраса, водораздел озерной котловины), и отбор проб почвенных разрезов с определением почвенных горизонтов» (Страховенко и др., 2022). Отбор почвенных проб производился на склонах водосборных территорий с одной стороны при отсутствии изменений в почвообразующих породах склонов и с различных сторон при сложном геологическом строении территории водосбора. Верхняя часть разреза почв опробовалась непрерывно до глубины 30 см металлическим кольцом (диаметр 82 мм и высота 50 мм) по методике для подсчета запасов техногенных радионуклидов

(Экологическое…, 2005), далее отбор производился шурфовым методом по генетическим горизонтам до почвообразующего субстрата.

Отбор проб горных пород производился при их наличии преимущественно в горных ландшафтах. Опробование всех возможных видов пород производилось при помощи молотка.

Песок с волноприбойной зоны отбирался во всех исследуемых озерах при наличии.

«Биологический состав сапропеля определён коллегами из ИВЭП СО РАН (Ермолаева Н.И., Зарубина Е.Ю.) с помощью поставленных экспериментов с седиментационными ловушками с целью определения качественного состава осаждающейся озерной взвеси и количественных параметров (потоки вещества на единицу площади дна)» (Ермолаева, 2013). Взяты образцы доминирующих видов растений на микроэлементы. Для определения первичной продукции фитопланктона использовали скляночный метод в кислородной модификации. Исследование водных фитоценозов проводилось стандартными методами на пробных площадках, заложенных в доминирующих на исследуемых участках фитоценозах. При переводе абсолютно сухого веса в чистую годовую продукцию для воздушно-водных растений использован коэффициент 1,2, для погруженных и плавающих – 2,5. Долю углерода в органическом веществе водных растений принимали равной 46,4 %, азота в пересчете на азот 2,0 % от абсолютно сухой массы, фосфора – 0,3 %. Соотношение автохтонного и аллохтонного вещества получено путем сопоставления прямых измерений скорости и объема седиментации с помощью ловушек (Гидробиологические…, 2016) и расчетов поступления отмирающей мортмассы планктона и макрофитов, с учетом фильтрационной активности зоопланктона и интенсивности формирования пеллетного потока (Ермолаева, 2013).

2.2 Аналитические методы исследования

Аналитические исследования компонентов озер производились в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, Аналитическом центре ФГБОУ ВПО «НГПУ», аналитическом центре ИПА СО РАН и ЦКП "НЦИК" института катализа СО РАН.

Определение общетехнических показателей (влажности, зольности, pH) донных отложений производилось по ГОСТу. Сушка проводилась до воздушно-сухого состояния в лабораторных условиях защиты от попадания посторонних веществ, при комнатной температуре и/или в сушильном шкафе (LOIP LF 240/300-VS1, Россия с базовым модулем управления TS87B) при Т менее 50^{o}C. Каждая проба гомогенизировалась и в дальнейшем происходила пробоподготовка для необходимого анализа.

В пробах компонентов озер методом атомно-абсорбционной спектрометрии с использованием пламенной и электротермической атомизации (спектрометр «Solaar M6» (Thermo Electron, США), снабженный зеемановским и дейтериевым корректором фона) определялись валовые концентрации макро– (Ca, Na, K, Al, Fe, Mg, Mn) и микроэлементов (Sb, Sr, Ba, Be, Cd, Co, Ni, Cr, Zn, Pb и т. д.). Анализ проводился согласно методике выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектрометрии (М-МВИ-80-2008, 2008)

Диапазон измерений массовой доли элементов соответствует методике (М-МВИ-80-2008, 2008) и представлен в таблице 2.1.

Границы суммарной относительной погрешности измерений ±30%, при доверительной вероятности Р=0,95.

Таблица 2.1. Диапазон определяемых содержаний и характеристика погрешности

Элемент	Диапазон определяемых содержаний, (ppm)		Характеристика погрешности, (%, P = 0,95)
	Электротермическая Атомизация	Пламенная атомизация	
Al	-	$5,0 - 5,0 \cdot 10^4$	30
K	-	$5,0 - 5,0 \cdot 10^5$	
Na	-	$5,0 - 5,0 \cdot 10^5$	
Mg	-	$5,0 - 5,0 \cdot 10^5$	
Ca	-	$5,0 - 5,0 \cdot 10^3$	
Fe	-	$5,0 - 5,0 \cdot 10^3$	
Be	$0,50 - 1,0 \cdot 10^3$	$5,0 - 1,0 \cdot 10^3$	
V	-	$5,0 - 1,0 \cdot 10^3$	
Cr	-	$1,0 - 5,0 \cdot 10^3$	
Mn	-	$1,0 - 5,0 \cdot 10^3$	
Co	$0,5 - 1,0 \cdot 10^3$	$1,0 - 5,0 \cdot 10^3$	
Ni	$0,5 - 1,0 \cdot 10^3$	$1,0 - 5,0 \cdot 10^3$	
Cu	-	$1,0 - 5,0 \cdot 10^3$	
Zn	-	$1,0 - 5,0 \cdot 10^3$	
Sr	-	$5,0 - 5,0 \cdot 10^3$	
Cd	$0,05 - 1,0 \cdot 10^3$	$1,0 - 5,0 \cdot 10^3$	
Sb	$5,0 - 1,0 \cdot 10^3$	$1,0 - 5,0 \cdot 10^3$	
Ba	-	$5,0 - 5,0 \cdot 10^3$	
Pb	$0,5 - 1,0 \cdot 10^3$	$1,0 - 5,0 \cdot 10^3$	

Валовое содержание ртути в пробах компонентов озер определяется по методике М 03-09-2013 (ПНД Ф 16.1:2:2.2.80–2013, 2013) на анализаторе «РА-915М» с приставкой «РП-91С». Предел обнаружения 1,0 ppm. Диапазон измерений и характеристика погрешности представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Диапазон определяемых содержаний и характеристика погрешности при определении общей ртути.

Диапазон определяемых содержаний, (ppm)	Характеристика погрешности, (%, P = 0,95)
От 0,005 до 0,10	45%
От 0,10 до 10	30%
От 10 до 250	25%

Контроль результатов атомно-абсорбционной спектрометрии проводился добавлением и анализом государственных стандартных образцов совместно с партией проб. Для почв использовали ГСО СГХМ-3, для донных отложений - БИЛ-1, для растительности – Тр-1. Допустимое отклонение результата измерения

массовой доли элемента в ГСО не превышает 84% от стандартного отклонения ($\pm 0{,}84 \cdot \delta$).

Макросостав твёрдых компонентов озер также определялся с помощью **рентгеноспектрального флуоресцентного анализа** на рентгеновском спектрометре «ARL-9900-XP» (Applied Research Laboratories, США) по методике Кармановой Н.Г. (Карманова, Карманов, 2011)

Диапазоны определяемых концентраций и погрешность анализа приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Диапазоны определяемых концентраций и характеристика погрешности рентгеноспектрального флуоресцентного анализа

Компонент	Диапазон определяемых содержаний, %	Характеристика погрешности, (%, P = 0,95) *
Na_2O	0,05 – 15	28 – 3,5
MgO	0,05 – 45	30 – 1,7
Al_2O_3	0,01 - 100	30 – 1,1
SiO_2	0,01 - 100	30 – 0,7
P_2O_5	0,01 - 2	21 – 4,3
K_2O	0,01 - 10	30 – 3,5
CaO	0,01 - 100	30 – 1,2
TiO_2	0,01 - 100	27 – 0,8
MnO	0,01 - 2	24 – 3,4
Fe_2O_3	0,01 - 100	30 – 0,7
BaO	0,005 - 0,5	30 - 16
SO_3	0,04 - 60	21 - 1
V_2O_5	0,01 – 0,15	25 - 16
Cr_2O_3	0,01 - 50	14 – 2,5
NiO	0,01 -0,3	23 - 5
ППП	0,2 - 50	11 – 1,4

* - для нижней и верхней границ определяемых содержаний.

Контроль результатов атомно-абсорбционной спектрометрии проводился по ГСО горных пород: МУ-1, МУ-3, МУ-4, СА-1, СЧТ-1, СЧТ-2, СДО-1, СДУ-1, СГ-1А, СГ-2, СГ-3. СГД-1, СГД-2, СГХ-1, СГХ-5, СГХМ-2, СГХМ-3, СИ-1, СИ-2, СНС-1, СНС-2, СОП-1, СТ-1 и искусственных смесей на основе MgO, SiO_2, Al_2O_3, TiO_2, CaO, $CaSO_4$, Cr_2O_3, Fe_2O_3. Погрешность определения не превышает таковую для второй категории точности (ОСТ 41–08–205–99, 1999).

Редкоземельный состав проб донных отложений, горных пород и воды изучен методом **масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой** на масс-спектрометре высокого разрешения ELEMENT (Finnigan MAT) с пневматическим концентрическим распылителем Майнхарда. Вода изучалась по методике ГОСТР 56219— 2014 (ИСО 17294-2:2003), пробы донных отложений и горных пород на стадии пробоподготовки подвергались кислотному разложению, сплавлению и т.д. Контроль результатов атомно-абсорбционной спектрометрии проводился по ГСО и внутреннему стандарту (In с концентрацией 1 мкг/л, который добавляли в анализируемые и градуировочные растворы). Характеристика погрешности при определении оценивается на уровне 5-7% при P = 0,95.

Минеральный состав твердых образцов компонентов озёр определялся методом **рентгеновской дифрактометрии (XRD)** на дифрактометре «ARLX’TRA» (излучение CuKα) (Thermo Fisher Scientific (Ecublens) SARL, Швейцария) по стандартным методикам (Руководство…, 1975; Рентгенография…, 1983). Диагностика низкотемпературных карбонатов кальцит-доломитового ряда, широко представленных в озёрах, затруднена из-за их высокой дисперсности (размеры кристаллитов <10 мкм), для решения этой проблемы использовались методические наработки Солотчиной Э.П. (Carbonates…, 2008; Климатическая…, 2010).

Изучение минерального состава дополнялось изучением морфологии и фазового состава образцов на **сканирующем электронном микроскопе** *«MIRA3 TESCAN»* (Tescan, Чехия), снабженного энергетическим спектрометром «OXFORD» (Oxford Instruments, Великобритания), позволяющим проводить количественный химический анализ в микрообъеме.

Анионный состав воды определялся в Аналитическом центре ФГБОУ ВПО «НГПУ». **Методом ионной хроматографии** производилось определение нитрита, нитрата, хлорида, фторида, сульфата и фосфата по методике ПНД Ф 14.1:2:4.132-98.

Элементный состав органической части донных отложений изучался **органическим элементным анализом Прегла-Думасана** (Dugan, Aluise, 1969) на анализаторе PE 2400 Series II CHNS/O (PerkinElmer) в аналитическом центре ИПА СО РАН. Диапазон измерений и характеристика погрешности представлены в таблице 2.4. Контроль результатов анализа и поверка прибора производились при помощи ГСО 9112-2008 и ГСО 9113-2008.

Таблица 2.4. Диапазоны определяемых концентраций и характеристика погрешности при изучении элементного состава органической части донных отложений

Компонент	Диапазон определяемых содержаний, %	Характеристика погрешности, (%, P = 0,95) *
C	28 - 72	10
H	2 - 7	10
N	8 - 30	10
S	11 - 27	10

Определение содержания анионов состава воды (нитрита, нитрата, хлорида, фторида, сульфата и фосфата) производилось **методом ионной хроматографии** в Аналитическом центре ФГБОУ ВПО «НГПУ» (аналитик Соснина О.И.) согласно аккредитованной методике (ПНД Ф 14.1:2:4.132–98, 2008). Диапазон измерений и характеристика погрешности представлены в Таблице 2.5.

Таблица 2.5. Диапазон определяемых содержаний и характеристика погрешности при определении анионного состава воды.

Диапазон определяемых содержаний, (ppm)	Характеристика погрешности, (%, P = 0,95)
0,1 до 75 мг/дм^3	13%
от 75 до 1000 мг/дм^3(разбавление пробы)	13%

Определение массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов производилось **расчётным методом** через данные титрования с определением свободной и общей щелочности воды (ГОСТ 31957–2012, 2013). Метод позволяет

определять массовые концентрации карбонатов от 6 до 6000 мг/дм3 и гидрокарбонатов в диапазоне от 6,1 до 6100 мг/дм3. Диапазон измерений и метрологические характеристики при определении щёлочности представлены в Таблице 2.6.

Таблица 2.6. Диапазон измерений и метрологические характеристики при определении щёлочности

Диапазон измерений щелочности, ммоль/дм^3	Показатель повторяемости (относительное среднеквадратическое отклонение повторяемости) σ, %	Показатель воспроизводимости (относительное среднеквадратическое отклонение воспроизводимости), σ_R, %	Характеристика погрешности, (%, P = 0,95)
Прямое титрование			
0,1 ≤ 0,5.	7	10	21
0,5 ≤ 10.	3	6	12
10 ≤ 100.	1	4	8
Обратное титрование			
0.1 ≤ 0.5.	15	19	37
0.5 ≤ 10.	4	6	12
10 ≤ 100.	3	4	7

Контроль результатов проводился при помощи определения состава водного раствора ГСО. Допустимое отклонение результата измерения в ГСО не превышает 1% при P = 0,95.

Оценка концентраций естественных и искусственных радионуклидов проводилась **гамма-спектрометрическим методом** на гамма-спектрометрах колодезного типа на полупроводниковом коаксиальном и сцинтилляционном детекторах. Данный метод анализа основан на регистрации гамма-излучения дочерних продуктов распада естественных и искусственных радионуклидов. Полупроводниковая гамма-спектрометрия проводится на коаксиальном детекторе из сверхчистого германия (HPGe) с предусилителем и низкофоновым криостатом EGPC 192-P21/SHF 00-30A-CLF-FA (производство фирмы «EURYSISMESURES», Франция). Объем изучаемой пробы равен 10 мл. Время экспозиции 30000 секунд. Большое время набора спектров связано с малым объемом пробы. Предел обнаружения 3 Бк/кг. Полупроводниковая гамма-спектрометрия позволяет

получать большой спектр различных радиоизотопов (210Pb, 238U, 226Ra, 232Th, 40K, 137Cs, 152Eu, 154Eu, 60Co и др.)

Сцинтилляционная гамма-спектрометрия проводилась при помощи больших NaI (Tl) кристаллов со свинцовыми колодцами на многоканальных анализаторах АМА-02 и АМА-03 и выполняется на основе методических разработок В.А. Боброва и А.М. Гофмана (Бобров, Гофман, 1971). Метрологические характеристики установок выведены по данным анализа стандартных образцов горных пород (Гавшин и др., 1999). Объем изучаемой пробы равен 300-330 см3, благодаря большему объему пробы, в отличие от полупроводниковой гамма-спектрометрии, время экспозиции значительно сокращено (1000 сек). Данная аппаратура имеет меньшее количество детектируемых радиоизотопов (238U (226Ra), 232Th, 40K, 137Cs). Но вкупе с оперативностью имеет достаточно высокую точность. Предел обнаружения 137Cs при массовом анализе оценивается величиной около 1-3 Бк/кг. Если указанная чувствительность определения недостаточна, то пробы отправлялись на анализ в КАНИФЕР, камеру низкого фона. Эта камера создана именно для определения ультрамалых содержаний радионуклидов, с защитой от естественного и космического радиационного фона. Предел определения 137Cs в этом случае составляет 0.01-0.03 Бк/кг - и ниже.

Контроль анализа производился с использованием эталонных образцов SA-1, SI-1 и БИЛ-1. Правильность определения естественных радионуклидов оценивалась в сравнении с данными для стандартных образцов МАГАТЭ. В работе методы использовались попарно для взаимного дополнения и проверки результатов, что позволило дополнительно исключить ошибки в определении концентраций радиоизотопов.

«Групповой состав органического вещества донных отложений **определен методом последовательной экстракции** по адаптированной методике, изложенной в работах (Параметры…, 1998; Кривонос, 2012). Предварительно высушенные и размолотые образцы сапропелей обрабатывали 0.05 н раствором соляной кислоты для удаления ионов кальция (ВР) (Взаимосвязь…, 2018). Из декальцированных воздушно-сухих проб извлекали водорастворимые вещества

(ВВ) кипячением в воде в течение пяти часов при соотношении образец растворитель 1:100. Затем экстракцией спирт-бензольной смесью (1:1) в аппарате Сокслета выделяли битумы (БВ). Гуминовые вещества (ГВ) извлекали обработкой 0.1 н раствором NaOH при температуре 20–25° С методом настаивания в течение 24 часов, затем дополнительной экстракцией при 80° С 0,02 н раствором NaOH. Из отмытого от щелочи и высушенного остатка извлекали легкогидролизуемые вещества (ЛГВ) (гемицеллюлоза и азотистые соединения) двукратной обработкой 2%-ной соляной кислотой при 90° С по 2,5 часа. Остаток отмывали и высушивали, а затем обрабатывали с целью выделения трудногидролизуемых соединений (ТГВ) (целлюлоза) 80%-ной серной кислотой в течение 2,5 часов, и далее кипятили с 5%-ной серной кислотой 5 часов при соотношении 1:100. Оставшаяся часть представляла собой негидролизуемый остаток (НГО)» (Генезис органоминеральных…, 2019).

2.3 Датирование и скорости осадконакопления

Скорости осадконакопления оценивались методами радиометрического датирования с использованием ^{210}Pb по модели постоянного потока (CRS) с проверкой пиками активности ^{137}Cs (по маркирующим горизонтам).

Существует целый ряд подходов к датированию современных органических, органоминеральных и минеральных осадков, но при отсутствии четко выраженной слоистости и следов хорошо датированных катастрофических явлений наиболее надежными методами датирования являются радиоизотопные методы, основанные на короткоживущих изотопах ^{137}Cs и ^{210}Pb. ^{210}Pb относится к природным радиоизотопам из семейства ^{238}U. Датирование основывается на определении неравновесной компоненты ^{210}Pb, не подкрепленной материнскими радионуклидами в современных отложениях. Равновесный ^{210}Pb образуется непосредственно в современных отложениях путем распада радия (^{226}Ra → ^{222}Rn → ^{218}Po → ^{214}Pb → ^{214}Bi → ^{214}Po → ^{210}Pb), поступающего с терригенными частицами с территории водосбора. Поскольку полураспад ^{226}Ra (1622 года) значительно

превышает полураспад ^{210}Pb (22,26 года), они находятся в радиоактивном равновесии, где ^{226}Ra является материнским радиоизотопом. Неравновесный ^{210}Pb образуется, когда ^{226}Ra, находящийся в горных породах и почвах, распадается на инертный газ ^{222}Rn. Часть атомов ^{222}Rn извлекается в результате эманации с поверхности земли и через ряд короткоживущих радиоизотопов распадается до ^{210}Pb в атмосфере. Впоследствии ^{210}Pb выпадает из атмосферы обратно на поверхность земли, акватории озёр, рек и т.д. и попадает в современные осадки. В дальнейшем активность неравновесного ^{210}Pb понижается в соответствии с законом радиоактивного распада.

Основа метода заключается в разделении активности неравновесного и равновесного ^{210}Pb и расчёте возраста осадка в соответствии с законом радиоактивного распада при определенных допущениях, которые отражены в различных методиках датирования:

- CIC (Constant Initial Concentration) – самая простая модель. В ней предполагается, что содержание ^{210}Pb монотонно снижается по профилю осадка, скорость осадконакопления определяется как тангенс угла наклона между кумулятивной массой осадка и концентрацией 210Pb в логарифмическом выражении (Goldberg, 1963);
- CRS (ConstantRateofSupply) – Модель базируется на допущении, что атмосферное поступление ^{210}Pb в донные отложения постоянно; скорость осадконакопления в пределах рассматриваемого промежутка времени (одной пробы) не меняется; нет постседиментационной миграции радиоактивных элементов (Appleby, Oldfield, 1978).
- SIT (SedimentIsotopeTomography) – применяется математическая прогностическая оптимизация данных содержания 210Pb по профилю колонки с использованием FurrierSeriesAnalysis, допускаются вариации по атмосферному потоку и скорости седиментации, диффузионная миграция и перемешивание исключаются (Carroll, Abraham, 1996);
- IMZ (IncompleteMixingZone) – Модель основывается на гипотезе о том, что определенная часть радиоизотопа (т. н. Labilefraction) мгновенно

перемешивается. Методом оптимизации экспериментального профиля активности ^{210}Pb в колонках осадка подбираются параметры модели (Dating of…, 1992).

В нашей работе используется модель постоянного потока ^{210}Pb (CRS), поскольку малые озёра почти полностью избавлены от перемешивания верхних слоев донных осадков, и, как следствие, перераспределения вещества, что дает необходимые допущения и необходимую точность для модели CRS.

Возраст осадка по модели CRS определяется по уравнению t=-1/λlnAq/Ay, где t-возраст осадка, λ-постоянная распада ^{210}Pb (0,03114), Aq-полный запас свинца в колонке, Ау-запас радионуклида ниже датируемого уровня (Appleby, Oldfield, 1978).

^{137}Cs относится к искусственным радиоизотопам и, как и ^{210}Pb, выпадает из атмосферы с аэрозольными частицами, а затем со взвесью поступает в донный осадок. Но в отличие от ^{210}Pb, поступление 137Cs не постоянно и привязано к определенным событиям - радиоактивным выпадениям в результате испытаний ядерного оружия или техногенных ядерных катастроф. Захораниваясь в современных осадках, ^{137}Cs образует маркирующие горизонты, привязанные к определённым событиям. Для территории исследования наличие радионуклида ^{137}Cs в осадках описывает несколько реперных точек, от которых исследователи отталкиваются для определения возраста отложений и его проверки.

Первая реперная точка — 1949 год — начало ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне. При соблюдении условия отсутствия постседиментационной миграции в осадках, отложившихся до 1949 года, содержание ^{137}Cs равно 0.

Вторая реперная точка — 1963 год – пик атмосферных ядерных испытаний с последующим их запретом.

Третья реперная точка — 1986 год и связанная с ним авария на Чернобыльской АЭС. Но на территории исследования данный пик не прослеживается.

2.4 Расчёт объемов донных отложений, запасов захоронённого углерода и скоростей депонирования

«Подсчёт запасов сапропеля, с дальнейшей оценкой запасов углерода производился по методикам геологоразведочных работ на озёрных месторождениях сапропеля» (Малов и др., 2023).

«Подсчёт запасов сапропеля произведён по границе зеркала воды озера; она же является нулевой границей сапропелевой залежи. Запасы захоронённого сапропеля на территории водосборов под торфом не учитывались. Средняя глубина сапропеля определена как средняя арифметическая величина с точностью до сантиметра. В подсчёт средней глубины включены все точки на пунктах зондирования и полусумма интерполяционных (нулевых глубин). Общий объём сапропеля определён как произведение средней глубины на площадь месторождения» (Малов и др., 2023). Пример расчётов представлен в таблице 2.7.

Таблица 2.7. Расчёт объема сапропелевой залежи оз. Песчаное.

№№ Поперечников	Сумма глубин, м	Количество зондировочных точек	Количество интерполяционных точек
1	3,5	4	2
2	10,6	6	2
3	5,6	4	2
4	12,8	7	2
5	9,4	6	2
6	14,2	8	2
7	9	6	2
8	10,7	6	2
9	6,2	4	2
10	2,5	3	2
Полусумма интерполяционных точек и глубин	0	10	
Итого	84,5	64	
Средняя мощность сапропеля = 84,5: 64= 1,32 м			
Площадь озера 126 га, Объём сапропеля равен 126 га х 1,32 м = 1664 тыс. $м^3$			

«Запасы сапропеля определены как произведение объёма сапропеля на выход сапропеля при 60 % влаги. Выход сапропеля при 60 % влаги определён по формуле:

$$P\ 60\% = V \times (100 - W_{еств.}) : (100 - W_{усл}), \quad (1)$$

где V – объем сапропеля в тыс. м3;

X – объемная масса сапропеля;

Wеств – естественная влажность сапропеля;

Wусл – условная влажность сапропеля, равная 60%.

Для озёр без подсчитанных запасов сапропеля, производилась оценка захоронения углерода на площадь 1 га и мощностью 1 м.

Расчёт захороненного органического углерода считался при допущении, что видовой состав биоты и/или соотношение C/H/N органической части не меняется или меняется незначительно со временем, что подкрепляется работой (Верес и др., 2012). Расчёт проведен по формуле:

$$C_{орг} = P_{сухх} \times N/100 \times L/100, \quad (2)$$

где $P_{сух}$ – запасы сухого сапропеля;

N – процент органического вещества;

L – процент углерода в органической части.

Расчёт углерода, захороненного в карбонатах, производился по формулам:

Для кальцита

$$C_{мин} = P_{сухх} \times Z/100 \times 0{,}3\ K_{Ca}/100, \quad (3)$$

где Pсух – запасы сухого сапропеля;

Z – зольность;

K_{Ca} – содержание Ca в сухой пробе в карбонатах.

Для доломита

$$C_{мин} = P_{сух} \times Z/100 \times 0{,}375\ K_{Ca,\,Mg}/100, \quad (4)$$

где $P_{сух}$ – запасы сухого сапропеля;

Z – зольность;

$K_{Ca,\,Mg}$ – содержание Ca и Mg в сухой пробе в карбонатах.

Скорости депонирования углерода в донные отложения рассчитывались как масса углерода захоранивающегося в донных отложениях за 1 год. Масса сапропеля, накапливающегося за 1 год, рассчитывалась на площадь в 1 га по формуле:

$$V = v*S, \quad (5)$$

где V – объем сапропеля в $м^3$ на 1 га в год;

v - Скорость осадконакопления;

S - 1 Га (10000 $м^2$)» (Малов и др., 2023).

Таким образом, используя формулы (1) и (2), можно рассчитать массу захоронённого углерода за 1 год.

2.5 Расчёт весового количества потенциальных поллютантов в нативном сапропеле

Расчёт весового количества потенциальных поллютантов в нативном сапропеле для каждого озера производился для нижней и верхней частей разреза.

Деление разреза производилось по данным датирования (Pb210) на участки моложе и древнее 100 лет.

Расчёт производился по формуле

$$M = \rho_{ск.\ зал} * V * K, \quad (6)$$

где M - масса элемента в залежи, т;

$\rho_{ск.\ зал}$ – плотность скелета сапропелевой залежи (содержание сухого вещества в ед. объема залежи), $т/м^3$;

V – объем сапропеля, $м^3$;

K – концентрация элемента в сухой пробе сапропеля, г/т.

Для стандартизации и удобства расчёта объем сапропеля принимался за 1 $м^3$. Концентрация элемента в сухой пробе сапропеля получена по данным аналитических исследований как средняя величина всех измерений. Плотность скелета сапропелевой залежи является расчётной величиной и рассчитывается по формуле:

$$\rho_{ск.\ зал} = \frac{\rho т * (1 - \omega)}{\omega * (\rho т - 1) + 1}, \quad (7)$$

где ω – относительная влажность сапропеля, %;

$\rho_т$ – плотность твёрдой фазы сапропеля, $т/м^3$

Относительная влажность бралась по данным аналитических исследований как средняя величина всех измерений для каждой части разреза; плотность твёрдой

фазы сапропеля — величина, прямо пропорционально зависящая от содержания органического вещества в пробе, для сапропелей она изменяется от 1,4 до 2,7 т м3. Зависимость исследована многими учёными (Филин, 1980; Штин, 2005; Смирнов; Казаков, 2011), и предложен ряд формул для расчётов; в данной работе используется формула Филина В.А.:

$$\rho_т=2,58-0,013*I, \quad (8)$$

где I - содержание органического вещества в пробе, полученное по результатам аналитических исследований.

2.6 Статистика

«Статистическая обработка данных анализов, включающая оценку параметров содержания хим. элементов в почвах, сапропелевых залежах, биоте, проверку гипотез о виде распределения, оценку корреляций, производилась при помощи программного продукта Статистика (Statistica 8), а также средствами MS Excel. Для наглядности компоновки полученных аналитических данных по всему массиву содержаний элементов в донных отложениях, и почве применен кластерный анализ (Михальчук и др., 2006). Для расчета использовалась матрица т × п (п – пробы донных осадков, биоты или почв; т – количество факторов или переменных (Ca, Mg, Na, Al, Fe, Si, U(Ra), Th, K). Число переменных в решениях изменялось с целью обнаружения устойчивых связей между переменными и получения устойчивых групп озер. Расчет производен для R-анализа – факторы (химические элементы). В R-анализе метрикой является коэффициент корреляции. Решения оформлены в виде дендрограмм корреляционных связей химических элементов в заданной совокупности объектов» (Страховенко и др., 2022).

ГЛАВА 3 ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

3.1 Литология

При отборе керна донных отложений сразу на месте, до апробации, проводилось визуальное литологическое описание керна донных отложений с целью выделения основных литологических слоев и установления их структурно-текстурных особенностей. Данный метод позволяет зафиксировать макроскопические характеристики донных отложений, которые впоследствии служат основой для более детализированных минералогических анализов. Описание осуществлялось с учетом следующих основных критериев: цвет и однородность материала, структура, текстура, включения, консистенция материала.

Для исследованных озёр характерна двухзональная структура с выделением верхней и нижней частей по зольности и уменьшением влажности. Верхняя часть в основном представляет собой тонкозернистые органоминеральные отложения с орехово-комковатой структурой и преимущественно массивной текстурой. Консистенция напрямую зависит от влажности осадка, от жидкой, сметанообразной до рыхлой (преимущественно для низкозольных отложений) и пластичной (для глинистых отложений). Основная цветовая гамма включает коричневые, зеленовато-бурые, табачные, серые и тёмно-серые оттенки. Повсеместно встречаются остатки макрофитов, ракушек, для озёр гумидного типа седиментогенеза в донных отложениях встречены прослои торфов, а также иногда углистые частицы. Иногда отмечается слабая слоистость или полосчатая структура, формирующаяся за счёт чередования органических прослоев с глинисто-алевритовыми и песчаными горизонтами. Гранулометрический состав пелитовый, алевро-пелитовый до псамитов в горных районах. Нижняя часть в

основном представлена минеральными илами и минерализованным сапропелем, гранулометрический состав пелитовый до алевролитового, текстура массивная, консистенция вязко- и мягкопластичная. Основная цветовая гамма включает серые и тёмно-серые оттенки. Граница между зонами, как правило, чёткая (Рис 3.1. Оз. Песчаное, Оз. Нижнее, Оз. Качкульня), но есть неединичные случаи постепенного перехода (Рис 3.1. Оз. Золотое, Оз. Щучье-л).

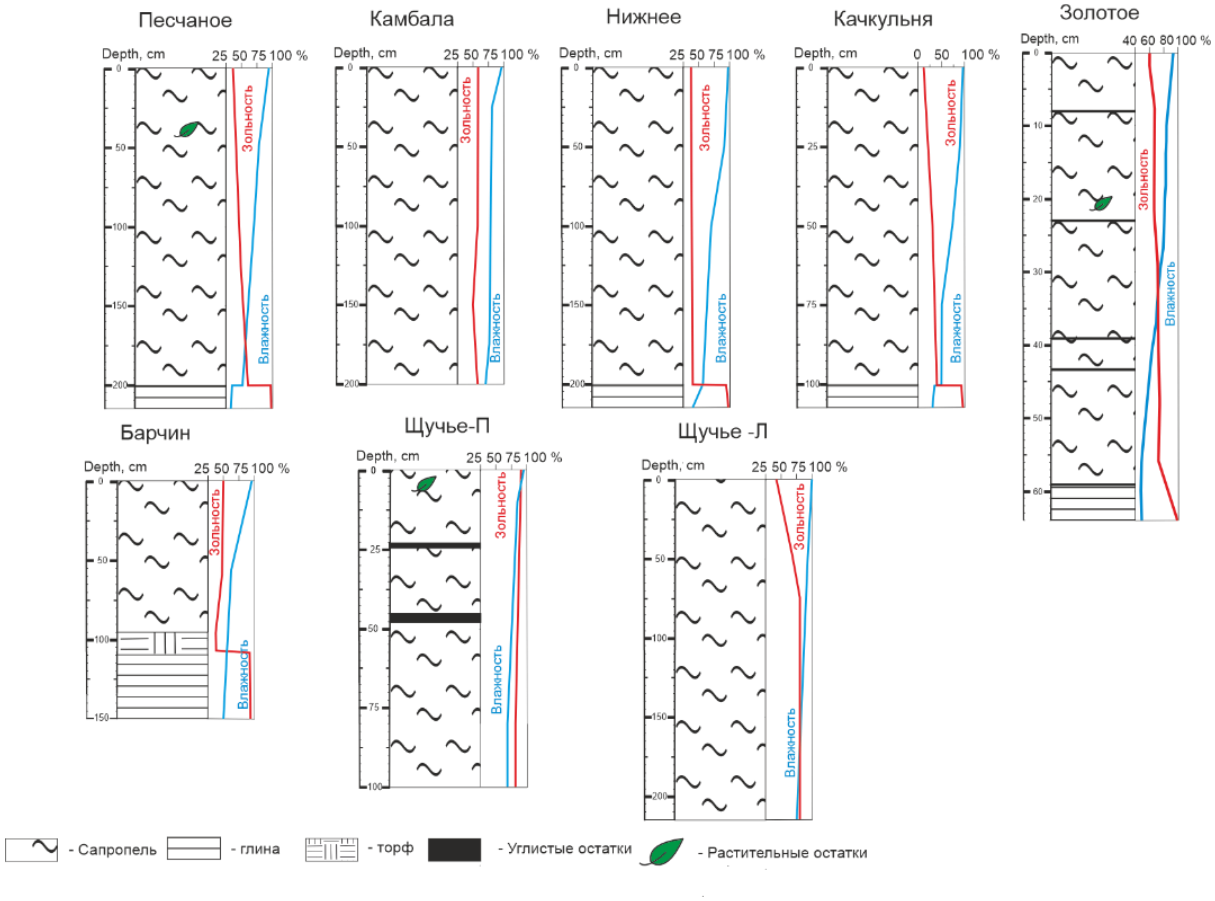


Рисунок 3.1 — Литологические колонки наиболее представительных озёр.

3.2 Минеральное вещество донных отложений

Выделение типов сапропеля производится по зольности (соотношение органической и минеральной частей): – «органогенный сапропель зольностью до 30 %; органо-минеральный сапропель с зольностью 30-50 %; минерально-органогенный сапропель с зольностью 50-70 %; минерализованный сапропель с зольностью 70-85 %; минеральные илы со значением зольности выше 85%» (Генезис органоминеральных…, 2019). Выделение классов сапропеля в каждом типе происходит по химическому составу по соотношению основных макроэлементов (Si, Ca, смешанные), а выделение видов производится по видовому составу преобладающей органической части в каждом отдельном классе сапропеля (Страховенко и др., 2014; Генезис органоминеральных…, 2019). Донные отложения исследуемых озёр представлены сапропелями разных типов и классов (рис. 3.2, 3.3). Среднее значение зольности в донном осадке в изученных озёрах составляет 65.3%, при стандартном отклонении 19.2 %. Минимальное значение 15.5 % обнаружено в донном осадке оз. Качкульня, максимальное значение 95 % — в донном осадке оз. Кротова Ляга. Наибольшая зольность характерна для аридных условий (медиана 79.5%), промежуточное положение (медиана 72.6%) занимают озёра, расположенные в условиях нивального типа седиментогенеза, а наименьшие значения характерны для озёр, расположенных в условиях гумидного типа седиментогенеза (медиана 54.2%). Среди донных отложений преобладает Si-класс (примерно две трети наблюдений), около четверти приходится на смешанный класс, а Ca-класс встречается редко (менее 10%).

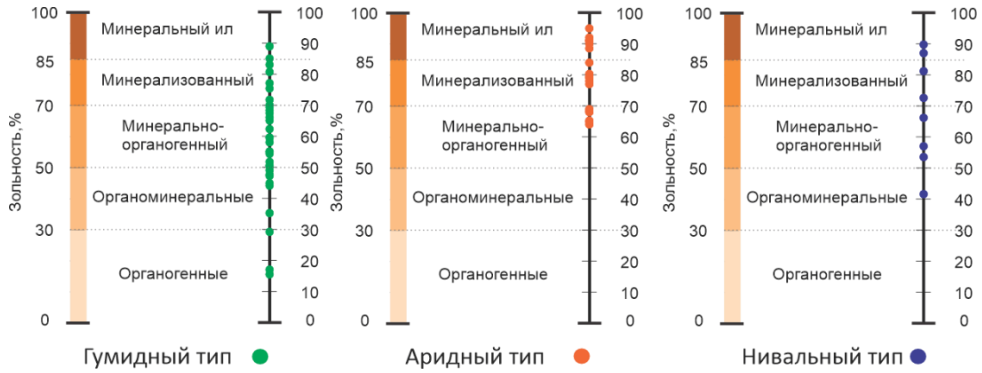


Рисунок 3.2 — Диаграмма распределения типов сапропеля для озер, расположенных в условиях различных типов седиментогенеза

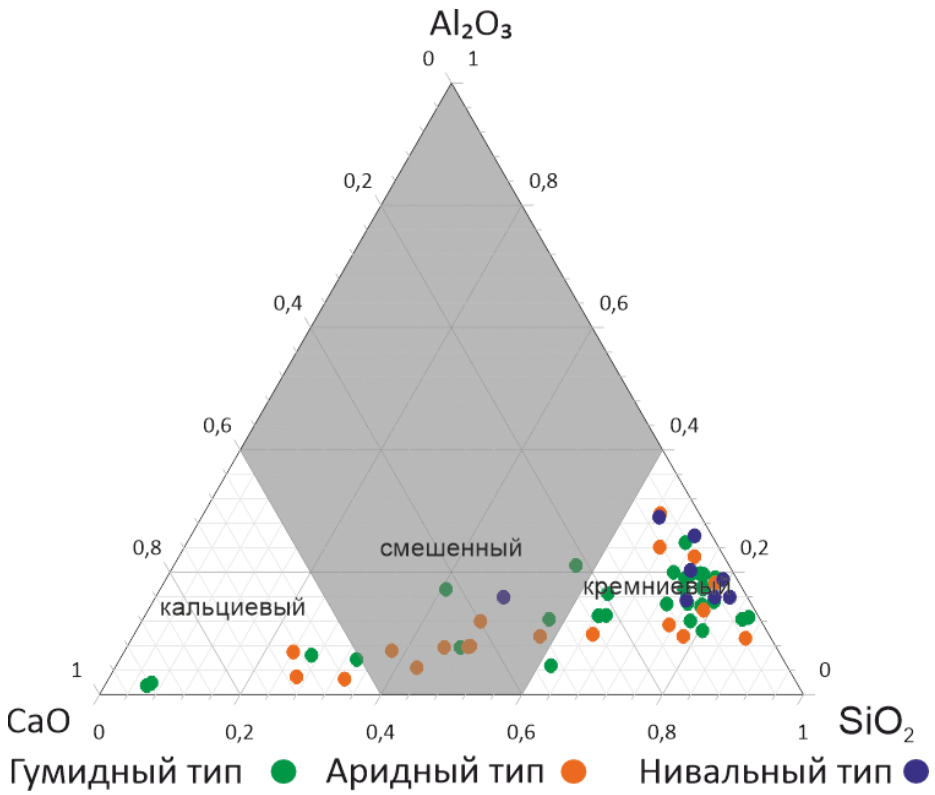


Рисунок 3.3 — Диаграмма распределения классов сапропеля для озер, расположенных в условиях различных типов седиментогенеза на основе соотношения Si, Ca.

Согласно данным исследования состава донных отложений на СЭМ «MIRA 3 TESCAN» и методом рентгеноструктурного анализа минеральную часть сапропеля (зольную) можно разделить на терригенную (аллохтонную) и аутигенную (автохтонную) части.

В терригенной составляющей во всех изученных озёрах преобладают кварц и полевые шпаты (альбит, олигоклаз, КПШ), слоистые силикаты (мусковит, хлориты (Fe~Mg), иллиты (Fe~Mg)). В виде примесей могут присутствовать роговая обманка, актинолит, эпидот и акцессорные минералы. Среди акцессорных минералов преобладают: магнетит, рутил, апатит, титанит, ильменит, циркон (Закономерности…, 2010; Страховенко и др., 2014; Геохимическая…, 2016; Генезис органоминеральных…, 2019; Страховенко, Овдина, 2021; Страховенко и др., 2023; Малов и др., 2023). Терригенный материал представлен хорошо сортированными неокатанными или слабоокатанными зернами пелитовой, пелит-алевритовой и реже псаммитовой (для горных районов) размерности.

Аутигенные минералы в донных отложениях имеют полигенный генезис: биогенный, биохемогенный, хемогенный. Установление генезиса аутигенных минералов в каждом конкретном случае — сложная комплексная задача. Представим аутигенные минералы по степени встречаемости.

Для озёр с кремниевым классом сапропеля и в меньшей степени со смешанным и кальциевым классами характерно присутствие диатомовых створок (аморфного кремнезема) в значительных количествах (оз. Песчаное до 35 % от общей массы донного осадка). Повсеместно встречаются псевдоморфозы SiO_2 по мортмассе макрофитов (оз. Ярголь до 46 % от общей массы донного осадка). В общей минеральной массе всех озер к обломочному кварцу добавляются халцедоновые глобулы, имеющие различный генезис. Для оценки соотношения биогенного и минерального кремнезёма использовалась методика количественного анализа чистого биогенного кремнезема по ИК спектрам. Оценка произведена для донных отложений 28 озёр Барабинской равнины. Наиболее интересные данные получены для озёр Б. Курган, Мостовое, Цыбово (Рис.3.4-3.6).

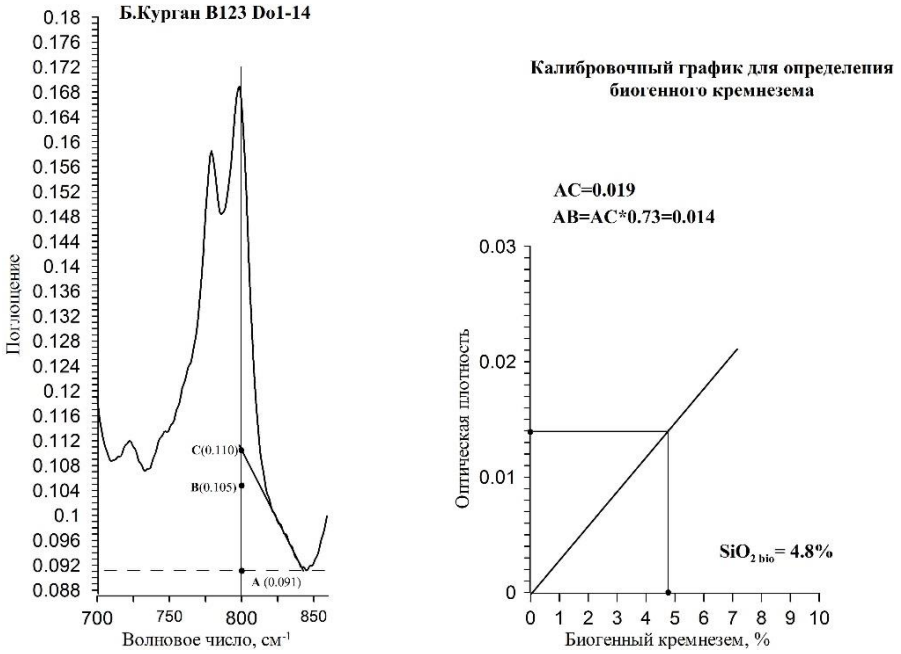


Рисунок 3.4 — ИК-спектры сапропелей с аналитической полосой (~800 см-1) и калибровочные графики для определения количества чистого биогенного кремнезема. Высокочастотное крыло аналитической полосы биогенного кремнезема остается свободным от перекрывания полосами других компонентов в области 820-860 см-1: Озеро Б. Курган.

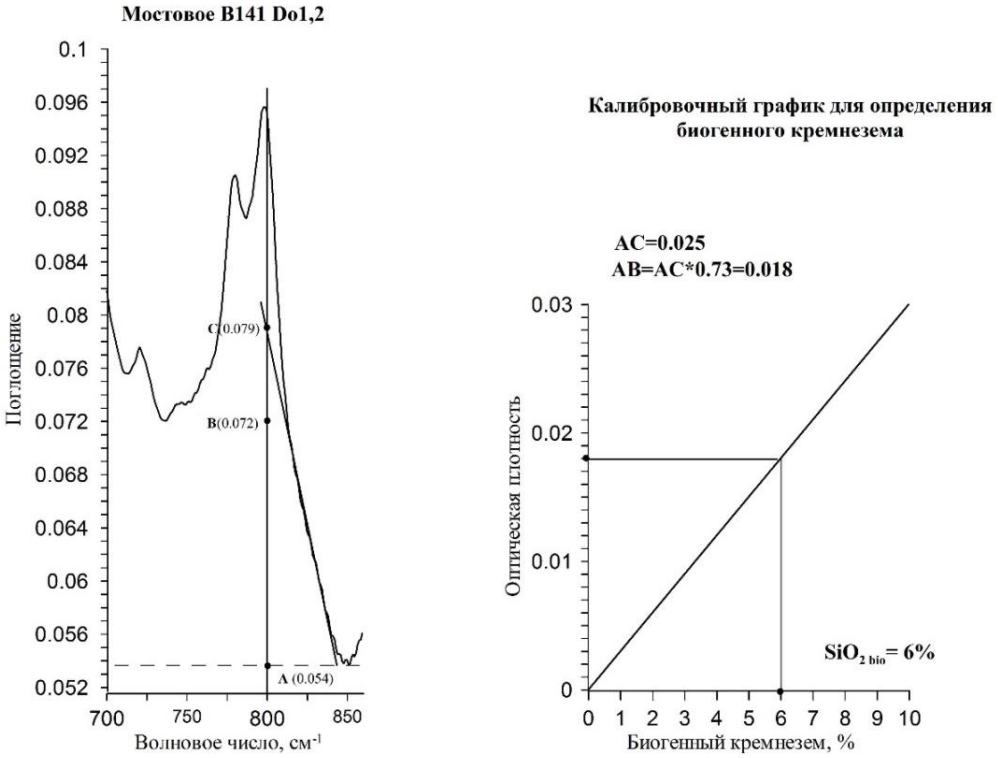


Рисунок 3.5 — ИК-спектры сапропелей с аналитической полосой (~800 см-1) и калибровочные графики для определения количества чистого биогенного кремнезема. Высокочастотное крыло аналитической полосы биогенного кремнезема остается свободным от перекрывания полосами других компонентов в области 820-860 см-1: Озеро Мостовое.

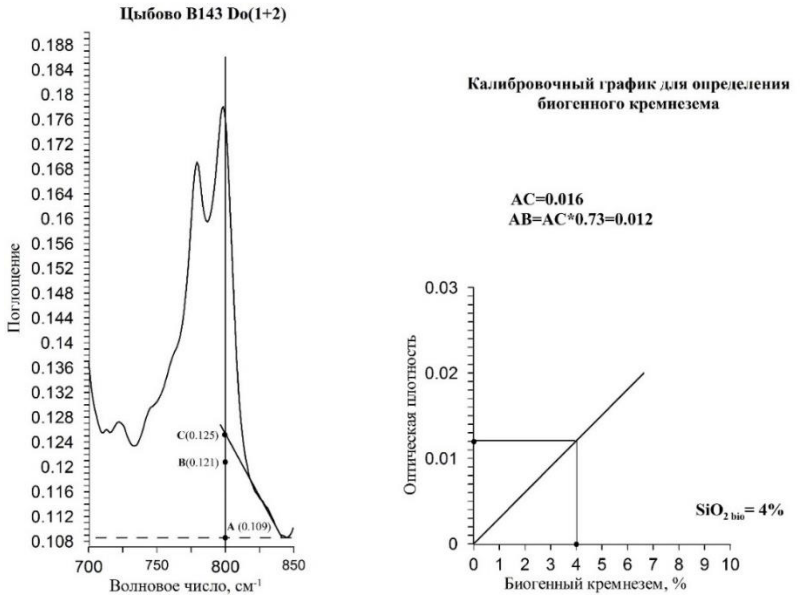


Рисунок 3.6 — ИК-спектры сапропелей с аналитической полосой (~800 см-1) и калибровочные графики для определения количества чистого биогенного кремнезема. Высокочастотное крыло аналитической полосы биогенного кремнезема остается свободным от перекрывания полосами других компонентов в области 820-860 см-1: Озеро Цыбово.

В донных отложениях озер биогенным кремнезёмом обычно сложены панцири кремнистых организмов ($mSiO_2 \bullet nH_2O$) и иногда остатки макрофитов (Рис. 3.7). Известно, что диатомовые водоросли (в частности, их панцири)

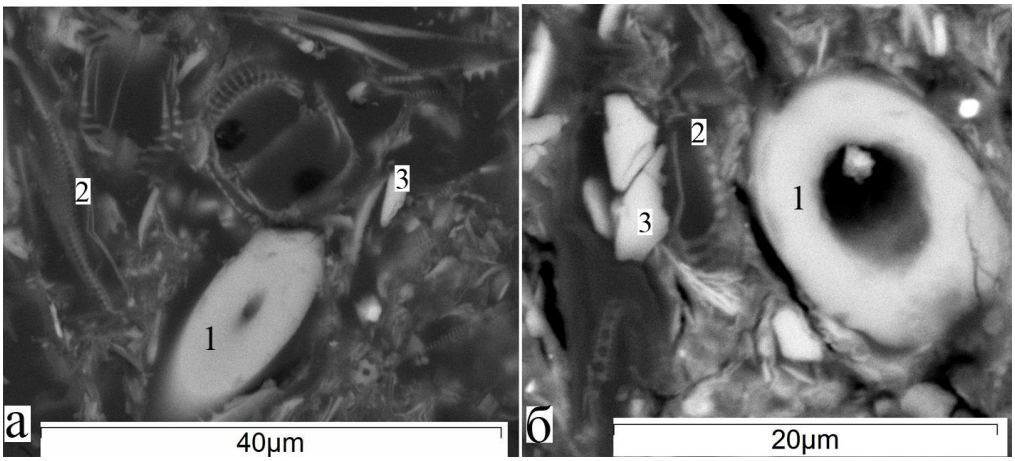


Рисунок 3.7 — Фотография СЭМ Mira 3 Tescan, BSE. а – донный осадок оз. Базовое Щучье (гумидный тип седиментогенеза) 1 - остатки макрофитов ($mSiO_2•nH_2O$); 2 - створки диатомей ($mSiO_2•nH_2O$); 3 - в ассоциации с агрегатами минералов терригенной фракции; б - донный осадок оз. Подкова (нивальный тип седиментогенеза) 1 - остатки макрофитов ($mSiO_2•nH_2O$); 2 - створки диатомей (mSiO2•nH2O); 3 - в ассоциации с агрегатами минералов терригенной фракции.

устойчивы к высокой температуре, гниению, воздействию щелочей и кислот. Только при значительном временном интервале происходит их преобразование в осадке в диагенезе и катагенезе, что приводит к растворению опала, его перераспределению с образованием конкреционных форм и раскристаллизации водного геля с образованием халцедона и затем кварца (Бурлин и др., 1991). То есть в современных илах панцири диатомовых не преобразуются.

Пирит является вторым минералом проявления, но не по количественному обилию (Рис. 3.8). «Наличие в донных отложениях озер большого количества микроорганизмов, преобладание восстановительных условий, нейтральной или щелочной среды, процессов деструкции органического вещества способствуют образованию фрамбоидального пирита. Пирит неравномерно распределен по всей колонке, иногда слагает тонкие слойки, гнездовые обособления, и местами образуют равномерную вкрапленность среди других минералов донного осадка. Изучение образцов донных отложений методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) показало, что пирит присутствует в виде отдельных кристаллов, групп кристаллов октаэдрического, кубического, пентагон-додекаэдрического, иногда кубооктаэдрического габитуса, размером от 1 до 2 мкм и фрамбоидов размером не более 0.01 мм во всех озерах. Фрамбоиды пирита — это

сферические агрегаты размером от 2 до 80 мкм плотноупакованных микрокристаллов, имеющих на начальной стадии образования округлую форму, далее октаэдрическую или кубическую, размером до 2 мкм» (Страховенко и др.,2023).

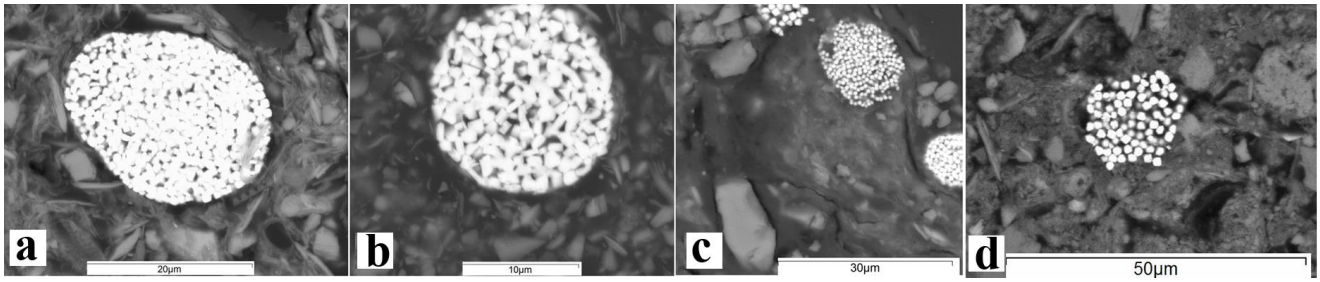


Рисунок 3.8 — Фотография СЭМ Mira 3 Tescan, BSE. a - фрамбоидные пиритовые образования представляют собой сферические агрегаты плотноупакованных микрокристаллов округлой формы на начальном этапе формирования в донных отложениях озера Теплый Ключ в нивальном седиментогенезе; b – фрамбоидные пиритовые образования в варвовых глинах Онежского ледникового озера в нивальном седиментогенезе; c - фрамбоидный пирит в донных отложениях оз. Базовое Щучье во влажном седиментогенезе; d - фрамбоидный пирит в донных отложениях оз. Танатар 6 в аридном седиментогенезе.

Среди современных аутигенных минералов малых озер Сибири широко распространены кальцит-доломитовые карбонаты, арагонит, изредка сидерит, родохрозит, магнезит. Формы выделения карбонатов: от микронных творожистых выделений до крупных строматолитовых образований в десятки сантиметров (Рис. 3.9, 3.10), корки на обломках горных пород, обрастание растительности и арагонитовые створки раковин. В общей массе донных отложений карбонаты представлены мелкими скаленоэдрическими и ромбоэдрическими кристаллами, срастаниями этих кристаллов в радиально-лучистые агрегаты, конкрециями и срастаниями со скелетами диатомовых водорослей.

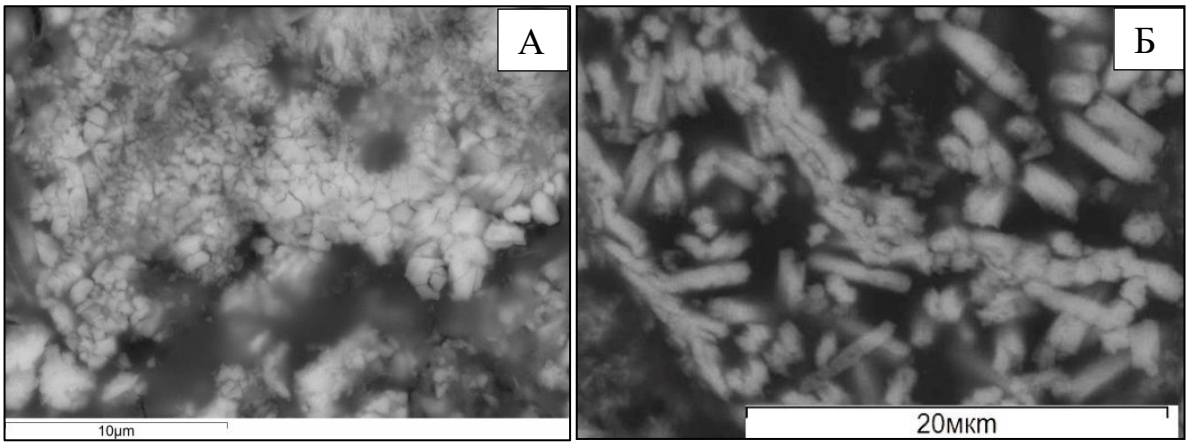


Рисунок 3.9 — Фотография СЭМ Mira 3 Tescan, BSE. А- «Творожистые» выделения кальцитов (оз. Бирюзовое); Б -Призматические агрегаты низко-Mg кальцита (оз. Танатар-4).

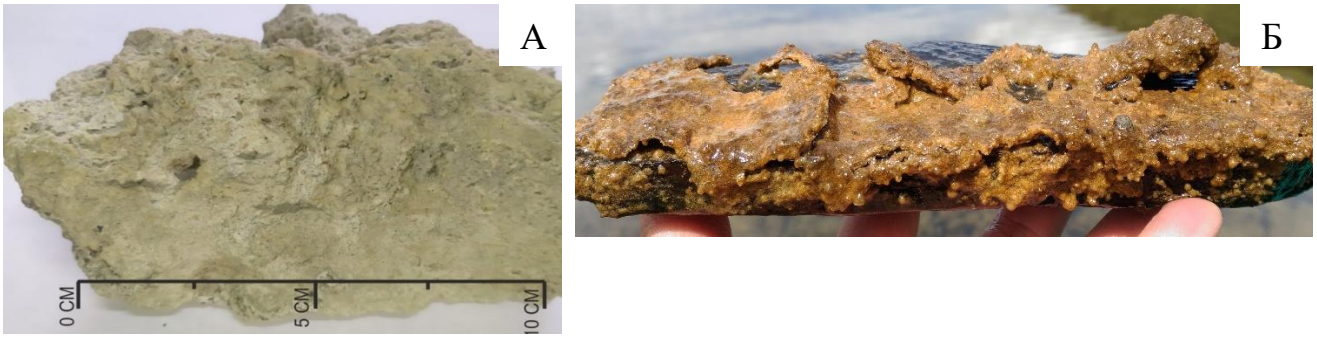


Рисунок 3.10 — А - Строматолитовые образования в оз. Петухово, Б - Карбонатные корки на обломках горных пород на дне озера в оз. Бирюзовое.

В результате наших исследований установлено, что карбонатные минералы начинают формироваться ещё в водной массе в виде тонких пленок на первичном каркасе водорослей, образуя мелкозернистые выделения арагонита и/или кальцита с низким содержанием магния в процессе жизнедеятельности водорослей на границе раздела сред "вода-водоросли" в озерах любой ландшафтной зоны и при минерализации вод от ультрапресных до рассолов. Согласно материалам одной из последних монографий Г.А. Заварзина и Н.Н. Колотиловой утверждается, что перевод растворенного бикарбоната в нерастворимый карбонат реален в слабо пресных озерах только при удалении CO_2, которое осуществляется в процессе фотосинтеза (Заварзин, Колотилова, 2001). Высокое содержание органического материала в верхней части осадка большинства озер, активно происходящие современные микробиологические процессы приводят к образованию низкомагнезиального кальцита в большой части изученных озер. Автохтонный карбонатный материал поступает на дно мелководных озер Сибири в основном в

составе пеллетного органоминерального материала, к которому добавляется карбонатное вещество бентоса. Обломки раковин представлены арагонитом, а растительные остатки, мельчайшие комковатые выделения представлены либо низкомагнезиальным кальцитом, либо арагонитом. В результате жизнедеятельности бактерий и грибков, которые в больших количествах обитают на дне в первых сантиметрах донных отложений, при анаэробном разложении исходного органического вещества ила образуются газы – CO2, H2S, NH3 и др. В результате этого в донном осадке образуются агрегаты низкомагнезиального кальцита различной морфологии. Биохемогенное карбонатообразование — это комплексный процесс, на который влияет как химический состав вод, так и видовой состав биоты. Даже при отсутствии Ca-содержащих минералов в осадке биота, аккумулирующая кальций, способна накапливать достаточное количество кальция для формирования новых карбонатов (Strakhovenko et al., 2019). В анаэробных условиях микробиологическое преобразование ОВ сопровождается активным газообразованием и снижением его концентрации. Состав, масштабы и динамика выделения генерирующихся газов зависят от содержания и состава исходного ОВ, направленности процессов его минерализации и времени их протекания. Поэтому количество растворенного новообразованного кальцита может сильно варьировать в разных осадках озер. Максимально процесс растворения карбоната происходит в период, когда озеро покрыто льдом. Но так как озера мелководны, то вымораживание приводит к резкому повышению общей минерализации оставшейся воды, что резко снижает возможность растворения карбонатов. Морфология и особенности внутреннего строения выделений высокомагнезиального кальцита и Ca-избыточных доломитов в донных отложениях озер не отличаются разнообразием. Преобладают мелкозернистые творожноподобные выделения с зернами различной формы. Округлые микрозернистые зерна доломита с избытком кальция и кальцита с высоким содержанием магния осаждаются из воды в донных отложениях только в соленых водах.

Также карбонатообразование в изученных озёрах возможно при криогенном минералообразовании для высокогорных озёр, где преобладает нивальный тип седиментогенеза. Криогенное минералообразование происходит вследствие концентрирования солей в пресных водах во время фазовых переходов воды в лед, которое приводит к смещению равновесий и образованию криогенных минералов (Иванов, 1998). В озерах с минерализацией воды <1 г/л захороненное органическое вещество, разлагающееся во время ледяного покрова вод, обеспечивает резко восстановительные условия в придонных водах, пересыщенных газами, особенно в зонах нивального типа седиментогенеза, что приводит к образованию корпусных, скелетных и дендритных форм при формировании метакристаллов карбонатов (3.11), сульфатов (гипс и ангидрит) (рис. 3.12) и барита (3.13). Движущая сила кристаллизации — локальное перенасыщение вод газами, которое создается за счет понижения температуры, повышения минерализации вод за счет вымерзания, разложения органического вещества, — определяет различные формы метакристаллов и иногда зональную структуру агрегатов (Рис. 3.13). В случаях кристаллизации минеральных фаз карбонатов, сульфатов и других солей из раствора в условиях

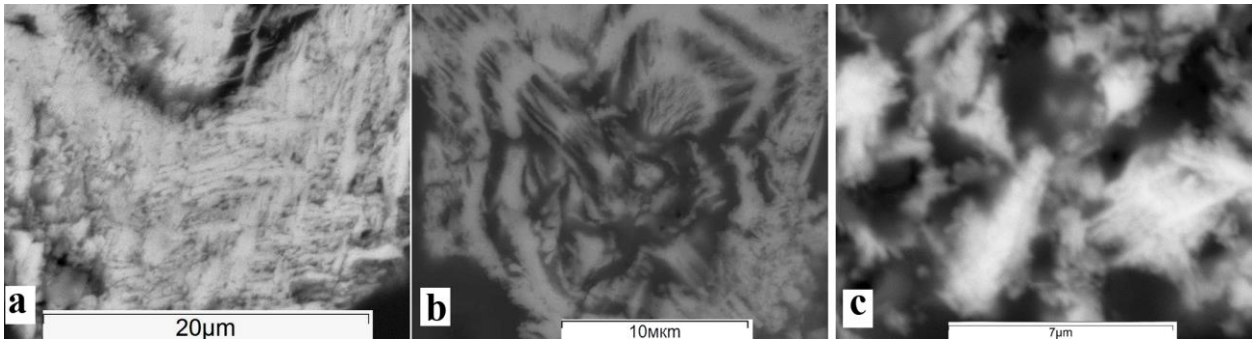


Рисунок 3.11 — Фотография СЭМ Mira 3 Tescan, BSE: a - дендритные (поликристаллические) агрегаты, состоящие из тонких пластинок кальцита в донных отложениях озера Большое Тархатинское в нивальном седиментогенезе; b – радиально-лучистые концентрически-зональные сферолиты кальцита озера Данилово во влажном седиментогенезе; c -дендритные (поликристаллические) агрегаты, состоящие из тонких пластинок кальцита в донных отложениях озера Рублево в аридном седиментогенезе.

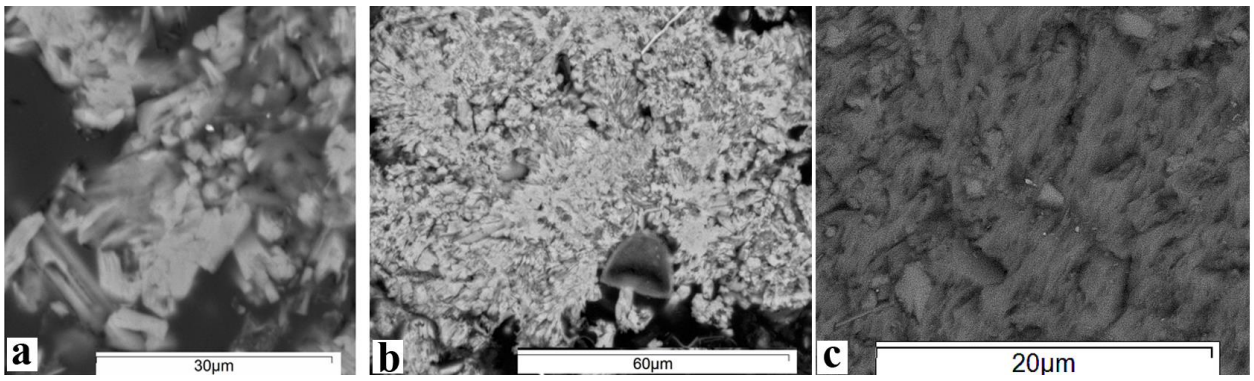


Рисунок 3.12 — Фотография СЭМ Mira 3 Tescan, BSE: a - скелетные формы метакристаллов гипса в донных отложениях озера Аргамджи в нивальном седиментогенезе; b – друзовый агрегат метакристаллов с футлярными формами ангидрита в донных отложениях озера Малое Щучье во влажном седиментогенезе; c - слияние тонких пластинчатых кристаллов гипса в донных отложениях озера Куречье в аридном седиментогенезе.

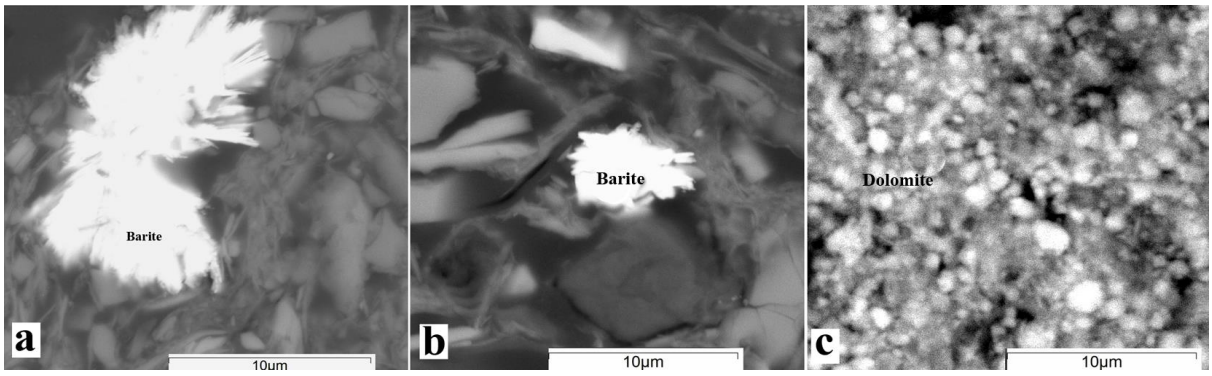


Рисунок 3.13 — Фотография СЭМ Mira 3 Tescan, BSE: a - радиально-лучистое расплавление баритовых плит в донных отложениях озера Малое Тархатинское в нивальном седиментогенезе; b – радиально-лучистое расплавление баритовой плиты в донных отложениях оз. Песчаное во влажном седиментогенезе; c - затвердевшие агрегаты доломита в донных отложениях озера Танатар6 в аридном седиментогенезе.

очень резкого пересыщения (когда минерализация воды высока (> 5 г/л)) еще до замерзания воды образуются скрытокристаллические образования (творожистые агрегаты доломита (Рис. 3.13), мелкоигольчатые агрегаты гипса (Рис. 3.12)). Длительное наличие ледяного покрова на озере, препятствующего перемешиванию водных масс, внесению терригенного материала и способствующего образованию участков с локальным перенасыщением воды газами, нарушает последовательность отложения солей, от карбонатов до хлорида натрия, и делает возможным совместное сосуществование метакристаллов гипса, кальцита, галита, доломита в одном агрегате. Для районов Горного Алтая, где находятся изученные озёра, характерно короткое лето с резким увеличением температуры воздуха. При этом таяние льда имеет лавинный тип, когда в короткий промежуток времени

большое количество терригенного материала и значительная часть новообразованных минералов захораниваются одновременно. Новообразованные минералы не успевают переходить в жидкую фазу и остаются в осадке.

3.3 Органическое вещество донных отложений

«В продуцировании органического вещества (ОВ) в водоемах участвуют микроорганизмы, водоросли и другие гидробионты, использующие энергию Солнца для синтеза органического вещества» (Страховенко и др., 2023). Синтезированное в водоеме ОВ (автохтонное) используется далее в пищевой цепи гетеротрофными организмами — зоопланктоном, зообентосом, рыбой. «Часть ОВ минерализуется в водной массе, а частично оно оседает на дно, переходя в состав донных отложений, где тоже используется гетеротрофами и минерализуется в результате деятельности аэробных и анаэробных микроорганизмов» (Шилькрот, 2008).

«По данным коллег биологов основными поставщиками органического вещества в донных отложениях являются бактерии, фитопланктон, зоопланктон, а также высшие растения, как водные, так и околоводные. Состав и структура водных биоценозов от озера к озеру значительно разнятся и как следствие вклад различных групп живых организмов в формирование донных отложений значительно различается, влияя на их химический состав» (Зарубина, 2013; Гидробиологические…, 2016; Зарубина, Феттер, 2022; Ермолаева, 2013). Максимальная скорость продуцирования органического вещества у исследованных озёр наблюдается для озёр, расположенных в условиях гумидного типа седиментогенеза. Но во всех исследуемых озёрах процессы продукции органического вещества преобладают над процессами деструкции, даже для высокогорных олиготрофных озёр.

Для оценки соотношения поступления автохтонного и аллохтонного органического вещества используется отношение C/N. В таблице 3.1 представлены средние значения элементного состава органической части донных отложений

исследуемых озёр в сравнении с элементным составом различных живых организмов (Холодов, 2006). Как видно из таблицы, для различных групп организмов широкий диапазон значений наблюдается в основном для азота и кислорода, содержание углерода же для всех организмов составляет около 50%, что видно и для органической части донного осадка.

Таблица 3.1 Средняя характеристика органического вещества различных групп организмов, составляющих биосферу (Холодов, 2006) с дополнениями автора

Группы организмов	Элементный состав			
	C	**H**	**N**	**O**
Деревья	50,0	6,1	0,2	43,7
Луговые и степные травы	50,0	6,1	1,4	42,5
Водные цветковые растения и донные водоросли	47,2	6,2	2,8	43,8
Планктонные водоросли	48,2	7,7	7,2	36,9
Зообентос и наземные беспозвоночные	51,8	8,0	10,3	29,9
Зоопланктон, рыбы, наземные позвоночные	52,4	7,9	11,7	28,0
Органическая часть донных отложений исследуемых озёр	**49,6**	**6,7**	**3,8**	**39**

Наиболее сильно меняется содержание N в различных видах живых организмов. Для высшей наземной растительности (аллохтонное органическое вещество) C /N> 30, для водных цветковых растений и донных водорослей C /N ≈ 20, для планктона, зообентоса и рыб C/N <10 (Meyers, Ishiwatari, 1993). Благодаря этому по соотношению C N в донных отложениях можно качественно определить источник поступления органического вещества. Для исследуемых озёр (Рис. 3.14) среднее соотношение C /N =13±3, что говорит о смешанном автохтонном веществе. Наибольшие значения характерны для озёр, расположенных в реликтовых борах (Танатар-4, Дёмкино, Петухово) и таёжной зоне (Щучье-Л) и связаны с поступлением вещества с большим количеством целлюлозы, что смещает соотношение C /N в большую сторону. Минимальные значения C/N соотносятся с малопродуктивными высокогорными (Зерлюколь-нур, Красное) и степными озёрами (Кусган, Куклей, Кротова ляга), из-за сурового климата первичная продукция в этих озёрах в основном представлена фито- и зоопланктоном.

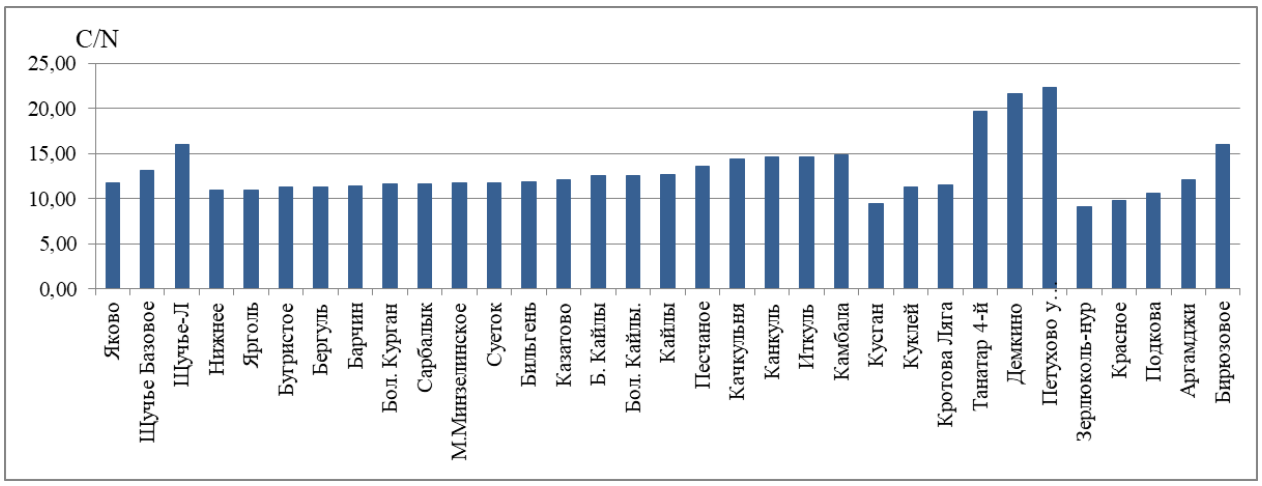


Рисунок 3.14 — Соотношение C/N в донных отложениях исследуемых озёр

Захоронение ОВ в донных отложениях происходит в результате осаждения содержащейся в водной толще органики. Интенсивность потока органического вещества ко дну во многом зависит от гидрологической структуры всей водной толщи, в частности от ее устойчивости к перемешиванию, приводящей к обособлению придонных участков воды (гиполимнион) и их толщины (Количественная…, 2018). В работе показано, что интенсивность деструкции ОВ в донных отложениях не зависит от возраста водоема, который определяет продуктивность его экосистемы (Внутриводоемные…, 2016). ОВ минерализуется в процессе осаждения в водной толще как под действием абиотических (фотодеструкция, анаэробное окисление), так и биотических (гетеротрофная биодеструкция) процессов, напрямую завися от глубины озера.

«При малых глубинах исследованных озер практически весь поток вещества, формирующийся в течение суток в верхних слоях озера, успевает достичь дна, практически не подвергаясь минерализации в столбе воды. Дальнейшая трансформация биологического материала, происходит на дне в результате жизнедеятельности бактерий и бентосных организмов» (Взаимосвязь…, 2018). Основными процессами деградации ОВ в донных отложениях в начальной стадии диагенеза вещества являются анаэробное окисление, гетеротрофная фиксация, метаногенез и метанокисление, являющиеся сложным комплексом биогеохимических процессов на дне озера. На рисунке 3.15 рассмотрена упрощённая схема круговорота углерода в системе вода-донные отложения.

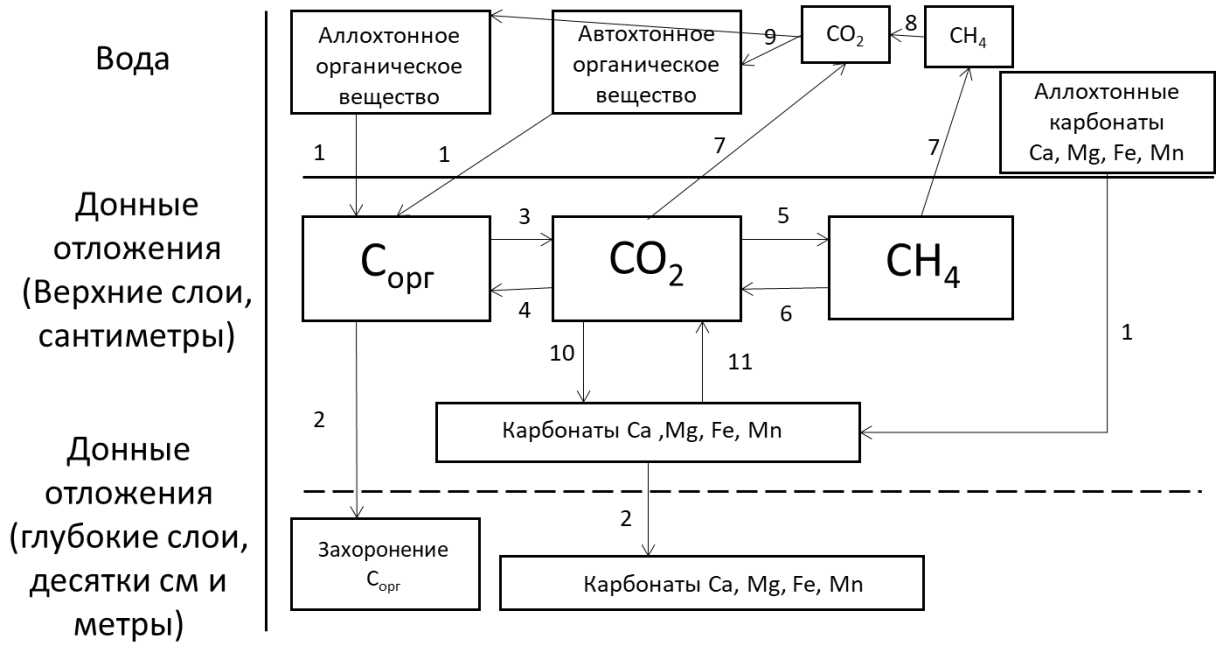


Рисунок 3.15 — Упрощенная схема круговорота углерода в системе вода — донные отложения: 1 — седиментация, 2 — захоронение, 3 — минерализация (анаэробное окисление), 4 — гетеротрофная фиксация, 5 — метаногенез, 6 — метанокисление (анаэробное), 7 — поток в воду, 8 — метанокисление (аэробное), 9 — фотосинтез, 10 — образование карбонатов, 11 — частичное растворение карбонатов. Составлено с дополнениями автора (Мартынова, 2010)

Захоронённое органическое вещество исследуемых озёр изучалось в рамках интеграционного проекта коллегами из ФИЦ ИК СО РАН в 2012-2014 гг. Групповой состав ОВ донных отложений определен методом последовательной экстракции, «с выделением следующих фракций: карбонатов, растворимых в холодной разбавленной HCl (КВ); веществ, растворимых в воде при кипячении (ВВ); битумов экстрагируемых спирт-бензольной смесью (БВ); гуминовых веществ (ГВ), включающих фульвовые (ФК) и гуминовые (ГК) кислоты; легкогидролизуемых в разбавленной соляной кислоте веществ (ЛГВ), трудногидролизуемых в концентрированной серной кислоте веществ (ТГВ) и негидролизуемого остатка (НГО)» (Взаимосвязь…, 2018). Как показали исследования, при широких вариациях видового состава биоты и зависящего от него группового состава ОВ элементный состав (CHSN) значительно не изменяется (Страховенко и др., 2014; Геохимическая…, 2016; Генезис органоминеральных…, 2019; Взаимосвязь…, 2018).

3.4 Скорости осадконакопления

Согласно расчетам скоростей осадконакопления по модели постоянного потока в разрезах донных отложений малых озер, расположенных в условиях нивального седиментогенеза, скорости осадконакопления составляют: в Улаганской долине Горного Алтая (оз. Бирюзовое –2.6 мм/год; оз. Игисту-Коль – 2.1 мм/г, оз. Подкова – 1,6 мм/г) и в высокогорье Укокского плоскогорья (оз. Малое Тархатинское – 2.7 мм/г; оз. Аргамджи – 3.9 мм/г, оз. Теплый ключ – 1,7 мм/г, оз. Зерлю-коль – 3 мм/г). В разрезах донных отложений малых озер, расположенных в условиях гумидного типа седиментогенеза, в таежном ландшафте различных территорий скорости накопления осадков в их естественном залегании в отдельном регионе от озера к озеру изменяются в тех же пределах, что и между разными районами и варьируют от 1.1 до 4.8 мм/год в подзоне южной тайги (Рис. 3.16, 3.17); в зоне подтайги от 0.5 до 2.0 мм/год (Страховенко и др., 2023). В пределах лесостепной зоны Сибири скорость осадконакопления от озера к озеру изменяется в пределах от 1.8 до 3.5 мм/год (Рис. 3.16, 3.17) (Strakhovenko et al., 2017). В разрезах донных отложений малых озер, расположенных в условиях аридного типа седиментогенеза, скорости осадконакопления среди изученных озер, расположенных в степи, в основном меньше, чем в зоне гумидного и нивального (горного) седиментогенеза (Рис. 3.16), но варьируют от 0.7 до 2.2 мм/год, а при добавлении скоростей осадконакопления для озер ленточных боров разброс значений возрастает до 4.5 мм/год. И в ленточных борах в озерах, расположенных на небольших расстояниях друг от друга, вариации значительны, так, например, оз. Рублево 1.5 мм/год, в оз. Танатар- 6 3.3 мм/год (около 20 км между ними).

Статистическая обработка данных показала отсутствие значимой зависимости скоростей осадконакопления от типов седиментогенеза и составов донных отложений. Есть умеренная отрицательная связь скоростей осадконакопления с Ca по Спирмену ($\rho = -0.484$), говорящая об уменьшении скоростей осадконакопления при росте карбонатов в ДО, но при этом для

большинства озер с сапропелями кальциевого и смешанного классов, скорости осадконакопления больше или равны средней скорости, также есть примеры, где озёра с сапропелем кальциевого класса (оз. Ленево) имеют скорости осадконакопления значительно выше средних (0,5 см в год). Отдельно стоит отметить значительные вариации скоростей осадконакопления для озер, расположенных на небольших расстояниях друг от друга. Так, озера Барчин и Камбала, находящиеся в 2 км друг от друга с единым геохимико-геоморфологическим ландшафтом, сопредельной площадью водосбора, общими источниками питания вод, имеют скорости осадконакопления 3 мм/год и 1,6 мм/год соответственно. Примером близко расположенных озёр с одинаковым составом донных отложений служат оз. Данилово и оз. Ленёво. Оба озера имеют минерализованный Са сапропель, схожий состав вод, почвообразующий субстрат на водосборе и генезис озёрных котловин, но скорости осадконакопления различаются в 5 раз.

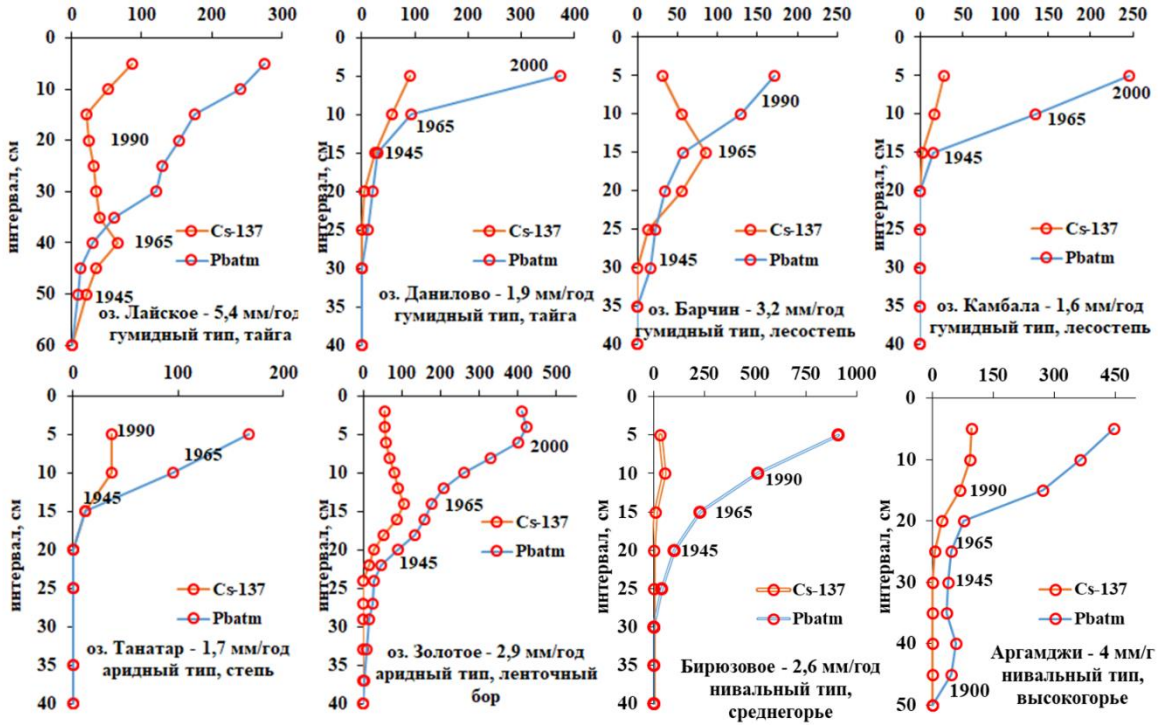


Рисунок 3.16 — Графики распределения Pb210 и Cs137 для изученных озёр, расположенных в различных ландшафтах в условиях разного типа седиментогенеза

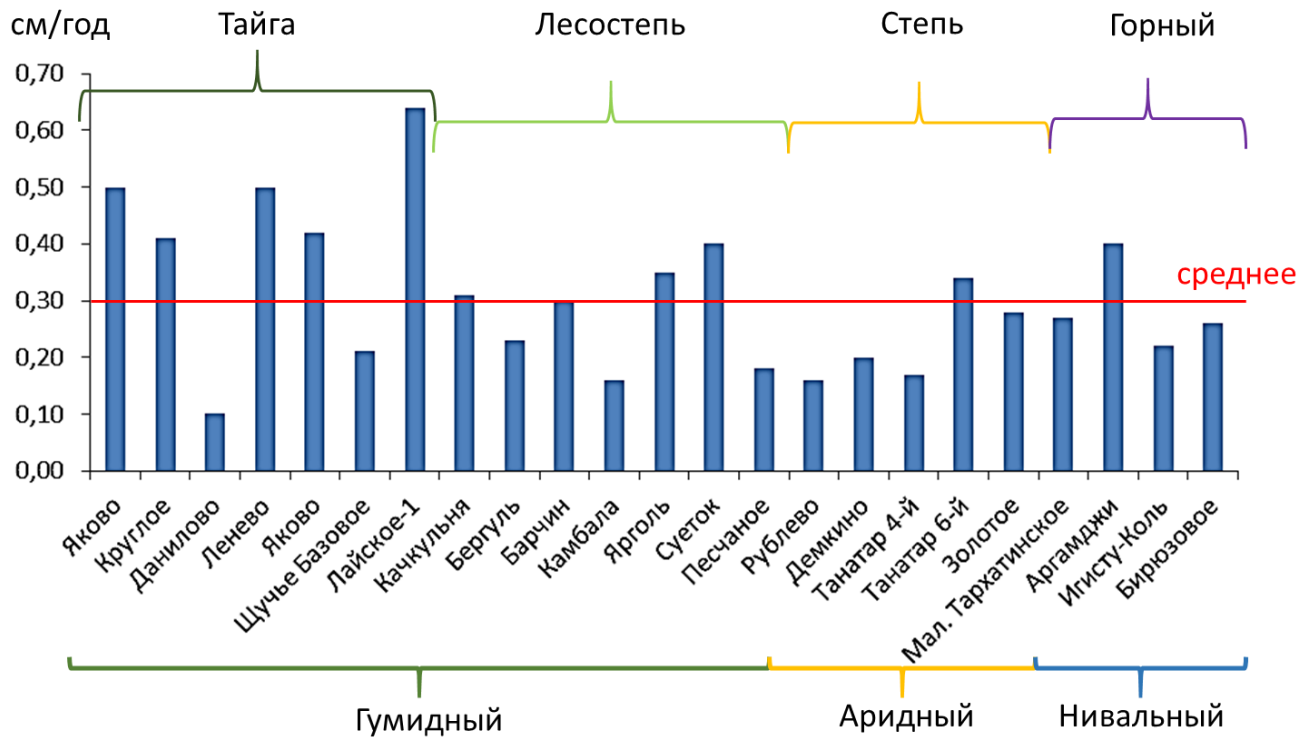


Рисунок 3.17 — Диаграмма скоростей осадконакопления для изученных озер, расположенных в условиях нивального, гумидного и аридного седиментогенеза

ГЛАВА 4 ДЕПОНИРОВАНИЕ УГЛЕРОДА ДОННЫМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ

Основными компонентами антропогенного воздействия на окружающую среду являются углекислый газ, метан и пары воды. Они ведущие биогенные химические агенты, участвующие в круговороте углерода. Континентальные водоемы (озера) не учитываются при различных оценках расчета процессов депонирования углерода. В современных условиях с ростом информации о глобальном круговороте углерода, его хранилищах и источниках появился запрос на изучение континентальных озер и болот, которые ранее не внесены в общий углеродный баланс планеты.

Круговорот углерода в закрытых водоемах включает в себя поступление углерода (карбонатного и органического) с водосбора, обменные процессы с атмосферой, захват углерода растительностью в процессе фотосинтеза, перераспределение соединений углерода по пищевым цепям, растворение в столбе воды при осаждении, карбонатообразование при седиментации, аккумуляцию на дне и обратное выделение углерода (CO_2, CH_4) из донных отложений в воду (Мартынова, 2010). Современное поступление органического вещества в донные отложения озера оценивается по валовой первичной продукции в озере, как описано в подразделе 3.3. В условиях гумидного типа седиментогенеза выявлена максимальная скорость продуцирования органического вещества в исследованных озерах. Во всех исследуемых озёрах процессы продукции органического вещества преобладают над процессами деструкции, даже для высокогорных олиготрофных озёр.

Как было показано в подразделе 3.3, среднее значение содержания Сорг в донных отложениях исследуемых озёр равно 49,6 от общего элементного состава органического вещества с учётом погрешности метода определения (CHNOS).

Следовательно, значения углерода в органической части донного осадка можно принимать за 50%, что подтверждается и данными других исследователей. Как видно из таблицы 3.1, для различных групп организмов широкий диапазон значений наблюдается в основном для азота и кислорода, содержание углерода же для всех организмов составляет около 50%, что видно и для органической части донного осадка. Исследованиями Хокансона отмечается высокая корреляция между потерями при прокаливании (ППП) при 300 С° и содержаниями органического углерода (Сорг), связанными уравнением С = 0,48 ППП - 0.73 (Håkanson, Jansson, 1983). Для приблизительного определения содержания органического углерода можно использовать уравнение ППП = 2Сорг, но в работе также установлено, что содержание Сорг увеличивается с уменьшением ППП и оно может быть определено по уравнению ППП = 2С лишь в том случае, когда значение ППП больше 10 % (Håkanson, Jansson, 1983).

Поступление в исследованные озёра аллохтонного карбонатного углерода не выявлено – все карбонаты имеют аутигенный генезис (См. главу 2). Поэтому поступление и захоронение углерода в озере в основном определяются двумя процессами: осаждением автохтонного органического вещества ($С_{орг}$) и образованием аутигенных карбонатов ($С_{мин}$).

4.1 Скорости депонирования углерода в донных отложениях

Под скоростью депонирования углерода фитомассой понимается разность между чистой первичной продуктивностью гидробионтов и гетеротрофным дыханием (эмиссия CO2 в атмосферу в результате минерализации органического вещества). Под минерализацией органического вещества автор понимает процессы преобразования сложных органических веществ в более простые минеральные (CO, H S, CaCO3, Na SO, NH, фосфаты, нитраты и др.), протекающие в ходе осадконакопления или при диагенезе осадков (Горная энциклопедия…, 1989). Прямые измерения этих величин на больших территориях и в сложных биоценозах в большинстве случаев невозможны. Как правило, эти значения получают на основе экспериментальных данных на карбоновых полигонах и экстраполируют

эти данные на однородные природные экосистемы, что дает значительные погрешности в определении. Также данный метод имеет ограничение - он подходит только для современных оценок и требует непрерывного мониторинга, и, как следствие, он не подходит для оценок депонирования углерода в органоминеральных отложениях (торф, сапропель).

Для определения скоростей депонирования углерода в сапропелевых залежах автором использован метод расчёта через скорости накопления осадка. Для этого берётся неизменённый стратифицированный разрез, датируется, затем определённая усреднённая скорость осадконакопления умножается на содержание углерода в пробе осадка. Поскольку скорости осадконакопления от озера к озеру даже отдельного региона изменяются в тех же пределах, что и между разными регионами (глава 3, подраздел 3.4 данной диссертации), при оценках скоростей депонирования необходимо использовать скорости осадконакопления для каждого конкретного озера.

На рисунке 4.1 приведены скорости депонирования углерода в донных отложениях малых озёр юга Западной Сибири, рассчитанные с учетом скоростей осадконакопления (Рис. 4.1).

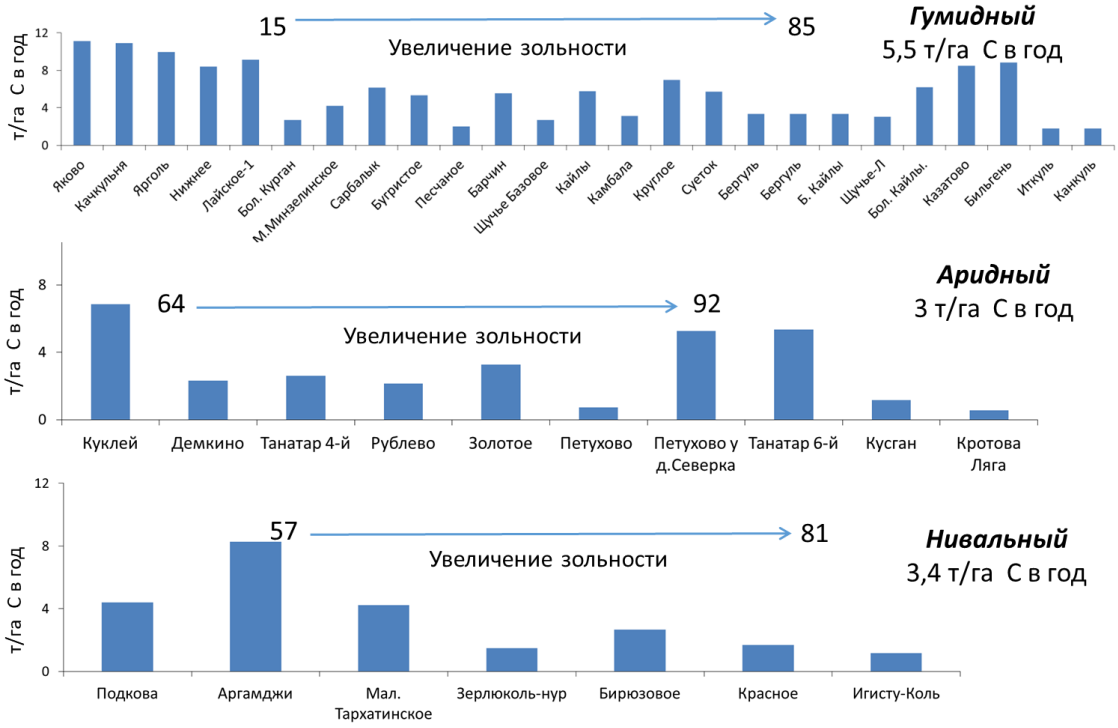


Рисунок 4.1 — Данные по скоростям депонирования углерода в исследуемых озёрах, расположенных в условиях нивального, гумидного и аридного седиментогенеза

В целом данные по скоростям депонирования углерода соотносятся с данными по первичной продукции озёр, наибольшие значения характерны для озёр гумидного типа седиментогенеза (таёжная зона, лесостепь), а минимальные — для низкопродуктивных степных и средне-высокогорных озёр нивального типа седиментогенеза. Усредненные значения по скоростям депонирования углерода для донных отложений составляют (Таблица 4.1, Рис. 4.2): 5,6 т/га в год для озер, локализованных в условиях гумидного типа седиментогенеза, 3 т/га в год и 3,4 т/га в год для озер, локализованных в условиях аридного типа седиментогенеза и нивального типа седиментогенеза соответственно. Усредненное значение скорости депонирования углерода в малых озёрах юга Западной Сибири составляет 4,62±2,9 т/га в год, минимальные значения относятся к оз. Кротова ляга (степь, аридный тип седиментогенеза) – 0,5 т/га в год, максимальные — к оз. Яково (таёжная зона, гумидный тип седиментогенеза) - 11,1 т/га в год.

Таблица 4.1 Статистические характеристики данных по скоростям депонирования углерода для озёр, расположенных в условиях различных типов седиментогенеза.

Тип седиментогенеза	Кол-во озёр	Среднее С, т/га·год	Ст. отклонение	Мин.	Макс.	Медиана
Гумидный	25	5.60	2.95	1.78	11.11	5.55
Аридный	10	3.02	2.15	0.56	6.85	2.45
Нивальный	7	3.41	2.50	1.16	8.27	2.66

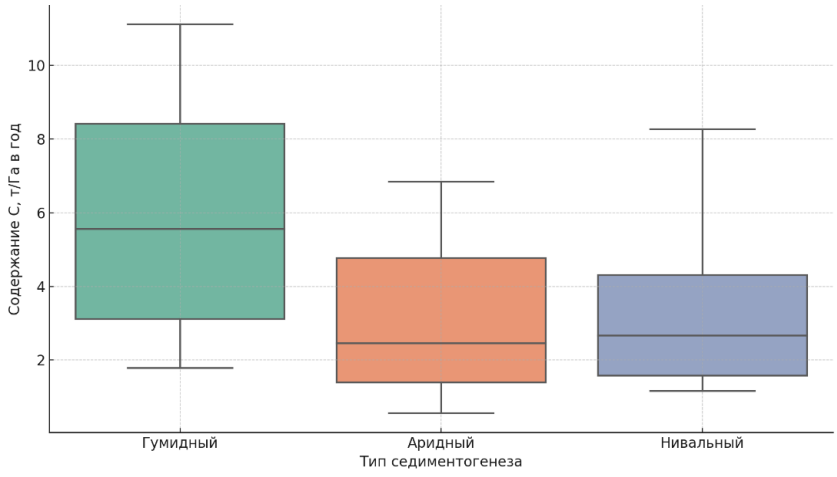


Рисунок 4.2 — диаграмма скоростей депонирования углерода в исследуемых озёрах, расположенных в условиях нивального, гумидного и аридного седиментогенеза

Но при этом в каждой ландшафтной зоне в условиях конкретного типа седиментогенеза присутствуют озёра с достаточно высокими и низкими скоростями депонирования углерода (Рис. 4.3). Примером могут служить озёра, локализованные на территориях с гумидным типом седиментогенеза (Песчаное, Канкуль, Щучье-Л), где либо благодаря активным процессам аутигенного минералообразования накапливаются высокозольные сапропели с низким количеством органического углерода, либо вследствие низких скоростей депонирования углерода. В сапропелевую залежь озера Иткуль, при высокой биопродуктивности озера (1,1 г/м2 в день), значимый вклад вносят диатомовые водоросли, створки которых состоят из аморфного кремнезёма ($SiO_{2биo}$), за счёт чего также образуются высокозольные сапропели (зольность 85%), что разубоживает количество органического вещества в определённом объеме и, как следствие, отрицательно влияет на скорости депонирования углерода. В условиях нивального и аридного типов седиментогенеза находятся озёра с достаточно высокими содержаниями органического вещества в донных отложениях (оз. Аргамджи – 47% и оз. Куклей – 36%) при таких условиях седиментогенеза. Связано это с высокой ураганной продуктивностью озёр (Зарубина, Феттер, 2022), что также определяет высокие скорости депонирования углерода.

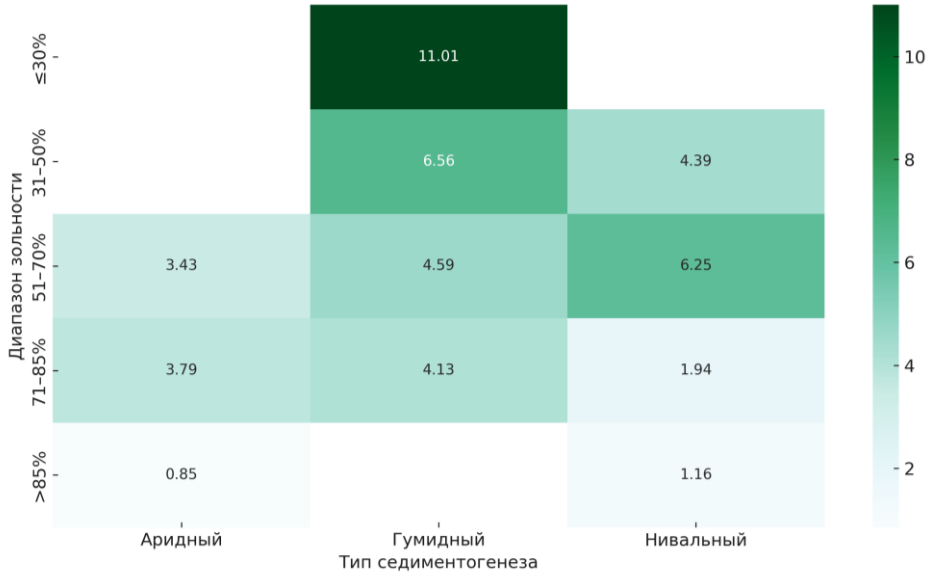


Рисунок 4.3 — Диаграмма скоростей депонирования углерода в зависимости от зольности в исследуемых озёрах, расположенных в условиях нивального, гумидного и аридного седиментогенеза

Следовательно, можно утверждать, что лимитирующими факторами, влияющими на скорости депонирования углерода, помимо региональных факторов, являются локальные факторы.

График сравнения скорости захоронения органического углерода в отложениях изученных озёр с данными других исследователей и со средними уровнями поглощения углерода в различных типах экосистем представлен на рисунке 4.4. Полученные оценки для озёр юга Западной Сибири соответствуют данным других учёных для внутриконтинентальных водных объектов в мире, превышая средние значения по скоростям депонирования углерода на шельфе и для болот (Рис. 4). Наблюдаемое снижение скорости депонирования с увеличением площади водоема согласуется с известными морфометрическими зависимостями, но локальные условия (биопродуктивность, зольность, интенсивность карбонатообразования) играют решающую роль. Влияние глубины озер на депонирование углерода не выявлено, поскольку при малых глубинах исследованных озер практически весь поток вещества, формирующийся в течение суток в верхних слоях озера, успевает достичь дна, практически не подвергаясь минерализации в столбе воды. Дальнейшая трансформация биологического материала происходит на дне в результате жизнедеятельности бактерий и бентосных организмов.

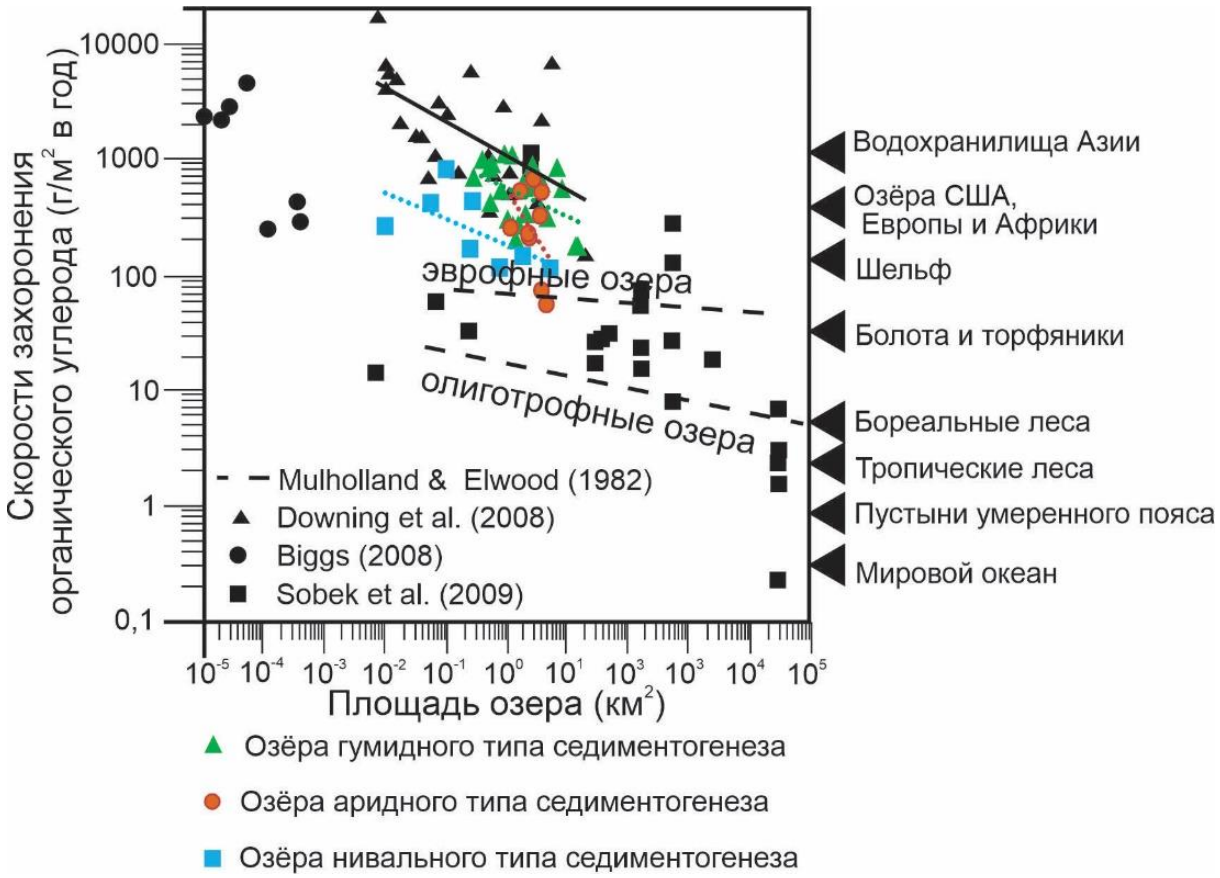


Рисунок 4.4 — График сравнения скорости захоронения органического углерода в отложениях озёр, находящихся в условиях различного типа седиментогенеза (данные авторов нанесены на график Downing J.A (Downing, 2010)). Стрелки справа указывают средние уровни поглощения углерода в различных типах экосистем. Чёрные квадраты, круги, треугольники – обобщённые данные других исследователей. Пунктир – линия тренда уменьшения скоростей захоронения при увеличении площади водоёма.

Полученные данные подтверждают результаты обзорного исследования Downing J.A (Downing, 2010), а именно, что малые водоёмы — одни из самых активных биоценозов, захоранивающих органический углерод в биосфере, поэтому их нельзя игнорировать в глобальном углеродном бюджете.

Поскольку данных по скоростям депонирования углерода в озёрах практически нет для территории России, а для территории Западной Сибири они отсутствуют, автором принято решение сравнивать полученные результаты со скоростями депонирования углерода в торфе. В научных статьях Головацкой Е.А. с соавторами оценено накопление углерода в болотах южно-таёжной подзоны Западной Сибири: оно составляет в среднем 0,19 тС/Га в год и изменяется от 0,11 до 0,26 тС/га в год (Головацкая, 2013). По данным Е.Д. Лапшиной, оно составляет 0,24- 0,56 тС/га в год, а по данным М.С. Боч для болот на территории бывшего

СССР — 0,12-0,8 тС/га в год (Carbon pools…, 1995; Лапшина, 2004). Все эти оценки значительно ниже полученных данных по захоронению углерода в донных отложениях озер в 10-20 раз, но полностью соответствуют данным исследователей других территорий мира. Объяснить это можно схожим количеством углерода в органической части отложений торфа и сапропеля – образование торфа происходит со значительно меньшими скоростями. Среди олиготрофных фитоценозов максимальной скоростью прироста торфа характеризуется грядово-мочажинный комплекс (0,77 мм/год) и низкий рям (0,63 мм/год), минимальной – высокий рям (0,25 мм/год) (Головацкая, 2013), что значительно меньше скоростей осадконакопления в озерах, рассчитанных в работе.

4.2 Соотношение карбонатного и органического углерода в донных отложениях озёр

Во всех ландшафтных зонах среди донных отложений малых озер выявлены сапропели, относящиеся по нашей классификации к органо-минеральному, минерально-органогенному, минерализованному типам и к кальциевому и смешанному классам (Ca≥Si). В данных озёрах значительную часть донных отложений занимают карбонаты, которые эффективно способны захоранивать углерод. С целью сравнительного анализа соотношений органического углерода и минерального углерода (карбонатного) проведена оценка на 15 озёрах кальциевого и смешанного классов (Ca≥Si) (таблица 4.2), расположенных в различных ландшафтных зонах в условиях всех трех типов седиментогенеза.

Таблица 4.2 Содержание органического и карбонатного углерода в донных отложениях малых озер разных зон

Озеро	Зольность, %	$C_{орг}$, %	$C_{карб}$, %
Гумидный тип седиментогенеза			
Качкульня	17	99,8	0,2
Ярголь	35	99,1	0,9
М. Минзелинское	45	97,6	2,4
Песчаное	50	92,3	7,7
Барчин	52	92,3	7,7
Кайлы	55	97,4	2,6
Бергуль	65	92,7	7,3
Щучье-Л	67	82,6	17,4
Канкуль	85	77,6	22,4
Аридный тип седиментогенеза			
Демкино	65	83,8	16,2
Танатар 4-й	65	84,8	15,2
Рублево	68	82,9	17,1
Золотое	69	84,4	15,6
Петухово у д. Северка	79	91,2	8,8
Нивальный тип седиментогенеза			
Бирюзовое	81	85,2	14,8
Подкова	41	99,29	0,71

Значение Сорг получено прямыми измерениями, а Скарб — расчётным методом через содержание Са в пробе. В работе Dean W. E (Dean, 1999) показана высокая корреляция и схожесть результатов по определению карбонатов в пробе прямыми и расчётными методами определения.

Как видно из таблицы, даже для высокозольных сапропелей содержание карбонатного углерода не превышает 22% от общего пула углерода в донных отложениях. Наибольшие значения характерны для озёр с минерализованным кальциевым и смешанным сапропелем (Рублёво, Дёмкино, Щучье-Л, Канкуль). Пространственных ландшафтных закономерностей не обнаружено, в каждой ландшафтной зоне при условиях различных типов седиментогенеза образуются

высокозольные карбонатные сапропели, но при этом наибольший пул углерода находится в органической части донных отложений.

4.3 Запасы углерода

Общие запасы углерода в сапропелевых отложениях в первую очередь определяются мощностью залежи и количеством органического вещества. Для расчета использовалась методика поисковых и геологоразведочных работ на сапропель с пересчётом запасов на углерод. Детальные подсчёты запасов производились для 5 озёр (Оз. Песчаное, Оз. Камбала, Оз. Качкульня, Оз. Ленёво, Оз. Бирюзовое).

«Подсчёт запасов сапропеля произведён по границе зеркала воды озера; она же является нулевой границей сапропелевой залежи. Средняя глубина сапропеля определена как средняя арифметическая величина с точностью до сантиметра. В подсчёт средней глубины включены все точки на пунктах зондирования и полусумма интерполяционных (нулевых глубин). Общий объём сапропеля определён как произведение средней глубины на площадь месторождения. Запасы сапропеля определены как произведение объёма сапропеля на выход сапропеля при 60 % влаги, пересчёт производился по среднему содержанию углерода в пробе, с учётом плотности и влажности сапропеля» (Малов и др., 2023). Приведем пример данных работ.

Пример подсчёта запасов углерода в сапропелевой залежи **оз. Песчаное.**

«По содержанию главных ионов, воды оз. Песчаного гидрокарбонатно-Na щелочные с вариацией значений pH 9,4 -9,8. По значению общей минерализации солоноватые (1,56 г/л). Показатель Eh положительный и достаточно высокий - 295 мВ, что свидетельствует об окислительной обстановке. Содержание кислорода достаточно высоко и варьирует от 7,1 мг/л. Согласно полученным аналитическим данным и литературным источникам, концентрации элементов в воде в основном ниже, чем их распространение в целом в гидросфере» (Малов и др., 2023; Генезис органоминеральных…, 2019).

«Почвенный разрез изучался с южной стороны озера шурфовым методом. Растительность представлена кострецовым лугом. Почва -луговая дерновая. Почвенный разрез представлен 5 слоями (таблица 4.3) (классификацию генетических горизонтов проводил Салтыков А.В.)» (Малов и др., 2023).

Таблица 4.3 Строение почвенного разреза и состав генетических горизонтов

Почвенный горизонт	Глубина залегания, см	Состав
Ад	0-10	серый, комковато-пылеватый, супесчаный, рыхлый горизонт с обилием корней
А	10-30	тёмно-серый, пылевато-комковатый, легкосуглинистый, уплотнённый горизонт с многочисленными корнями и трещинами до 3 мм
АВ	30-59	тёмно-серый с черноватым оттенком, комковатый, легкосуглинистый, плотный горизонт с малочисленными корнями
С	59-78	буровато-белёсые супесчаные сильно уплотнённые карбонатные отложения с единичными корнями
С	>78	ярко-бурые глинистые отложения

«Генетически почвообразующие породы представлены озерно-аллювиальными и субаэральными лессовидными отложениями, преимущественно алевритового гранулометрического состава с разной степенью засоления. В минеральном составе преобладают кварц и полевые шпаты» (Малов и др., 2023).

«Строение озёрной котловины и сапропелевой залежи изучено непосредственным зондированием, с использованием эхолота и опробованием плотностью 1 точка на 12 га и 1 точка на 1,6 га, соответственно (Рис. 4.5). Кровля озёрной котловины имеет блюдцеобразную форму с крутыми краями, форма округлая, вытянутая, вытянутая с севера на юг со значительным сужением на севере. Длина озера равна 1550 м, ширина 1200 м. Кровля озёрной котловины сложена алевропелитом (в составе резко преобладают кварц, полевые шпаты) с зольностью 98%. Граница с сапропелевой залежью чёткая, и говорит о резкой смене и условий осадконакопления» (Малов и др., 2023).

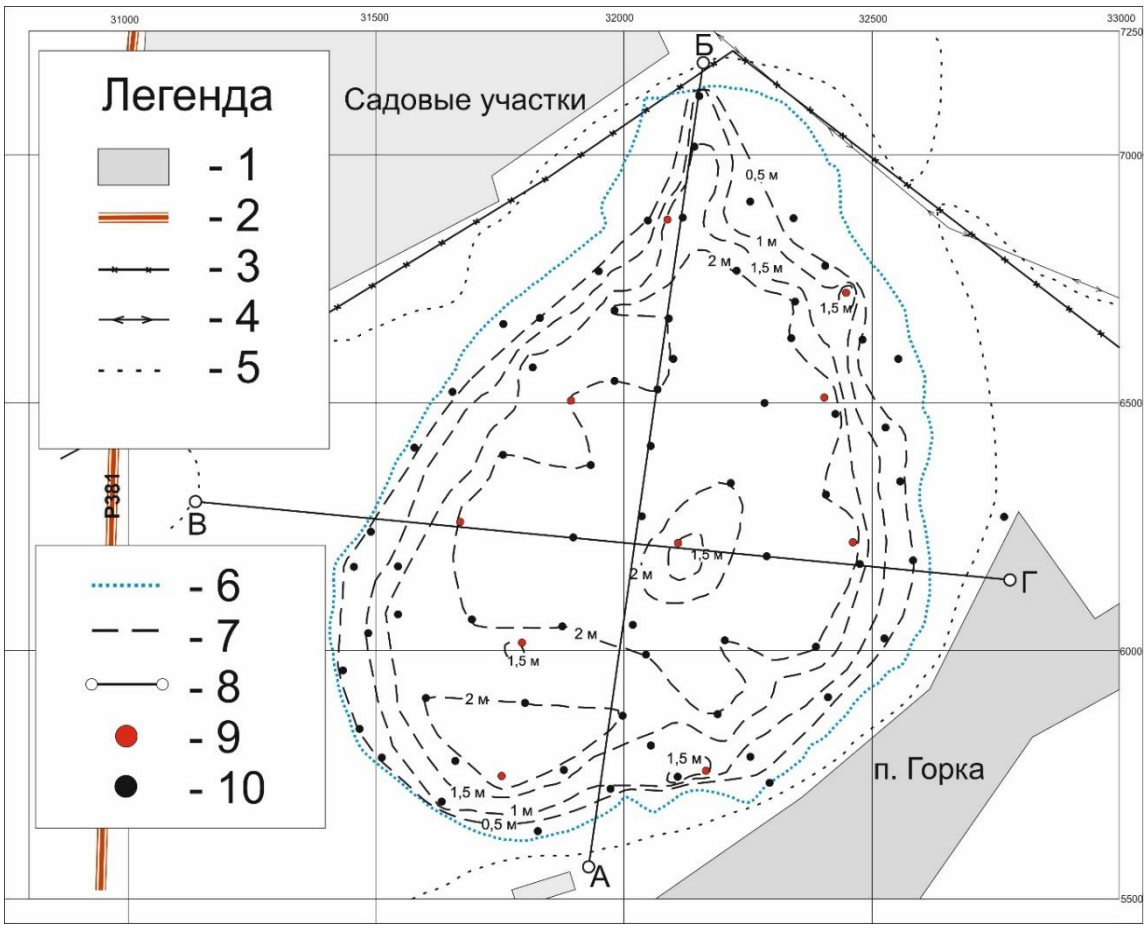


Рисунок 4.5 — Схема строения сапропелевой залежи оз. Песчаного
1 – Граница населённых пунктов, 2 – Дорога, 3 – Граница Барабинского и Куйбышевского районов, 4 – ЛЭП, 5 – Граница заболоченной территории, 6 – Граница зеркала воды и нулевая граница сапропеля, 7 – Изогипсы мощности сапропелевой залежи, 8 – Линия разреза, 9 – Пункт опробования, 10 – Точка зондирования

«Средняя мощность сапропеля в озере 1,32 м, максимальная 2,23 м. Изучение структурно-морфологических и текстурных характеристик сапропелевой залежи не выявило каких-либо значимых различий в её толщи: структура тонкозернистая, текстура массивная, сапропель табачного цвета, с большим количеством ракушек и сильным запахом сероводорода. На глубине 45-50 см в центре озера найдены остатки тростника, свидетельствующие о возможном обмелении озера (рис.4.6)» (Малов и др., 2023).

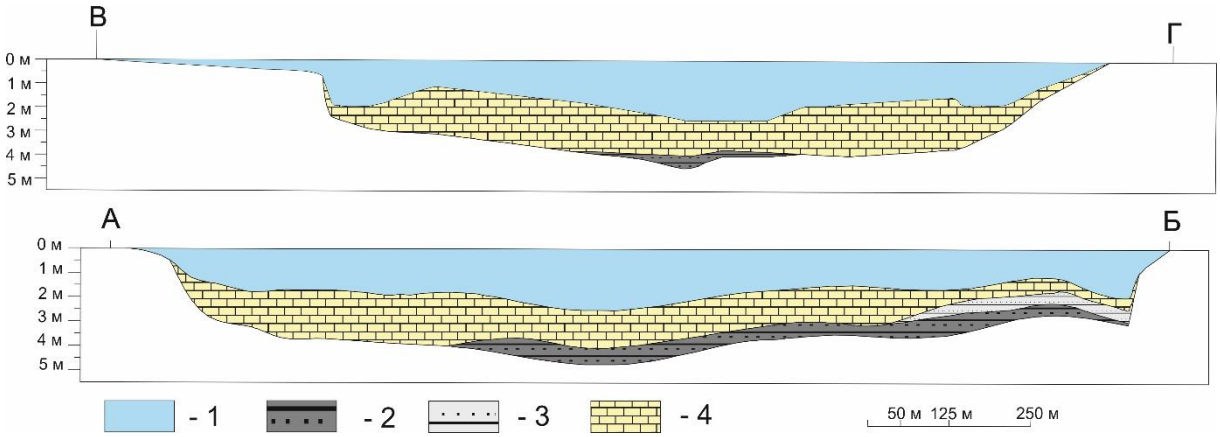


Рисунок 4.6 — Разрезы оз. Песчаного. 1- Вода, 2- Органоминеральный кремниевый сапропель, 3- Минерально-органогенный кремниевый сапропель, 4 – Органоминеральный кальциевый сапропель

В озере фиксируются три этапа формирования сапропелевой залежи, выделенные по смене химического и минералогического состава сапропеля. Состав пачек отличается концентрациями Si, Ca, по которым и определяется класс сапропелевой залежи в пачках. Выделяются органоминеральный кальциевый (69,7%), органоминеральный кремниевый (15,15%) и минерально-органогенный кремниевый (15,15%) (Рис. 4.3, Таблица 4.4).

Таблица 4.4 Химический состав сапропелевых отложений оз. Песчаного

Класс и тип сапропеля	**ППП**	**Si**	**Fe**	**Al**	**Ca**	**Mg**	**K**	**Na**
органоминеральный кальциевый	59	9,1	0,6	1,1	10,2	0,8	0,3	0,4
минерально-органогенный кремниевый	36	27,3	1,2	3,0	5,1	0,7	0,7	0,7
органоминеральный кремниевый	55	25,6	1,9	2,2	2,9	0,7	0,6	0,5

«Согласно полученным аналитическим данным и изучению с помощью СЭМ минерального и фазового состава донных отложений выявлено три основных их составляющих: обломочная, аутигенная, биогенная. Видовой состав органической части сапропеля изучался в двух точках, поскольку, как показывают исследования, биота в малых озёрах довольно равномерно распределяется по акватории, с выделением 2-х зон: пелагиаль и литораль (Гидробиологические…, 2016). Среднее количество органического вещества в донном осадке 53,5 %. Элементный состав органической части представлен O- 26,5, C - 31,67 %, H - 3,67%, N - 2,33%, S - 2,33 %. Изучение зависимости соотношения H/C(0,12) от O/C(0.84), величины

первичной продукции макрофитов, фито- и зоопланктона, осаждающейся озерной взвеси (седиментационные ловушки), показало, что сапропели озера Песчаное имеют преимущественно планктонное происхождение с преобладанием фитопланктона. Преобладание в групповом составе органической фракции легкогидролизуемого вещества также указывает на её автохтонный генезис (Генезис органоминеральных…, 2019). Биогенная минеральная составляющая представлена створками диатомовых водорослей, состоящих из аморфного кремнезёма, также обломками раковин кальцитового или арагонитового состава. Минеральный состав обломочной фракции донных отложений определяется наличием кварца, полевых шпатов, слюдой, хлоритом, акцессорными минералами (Рис. 4.7). Обломки минералов имеют алевро-пелитовую размерность, слабоокатаны и хорошо сортированы, неизмененные» (Малов и др., 2023).

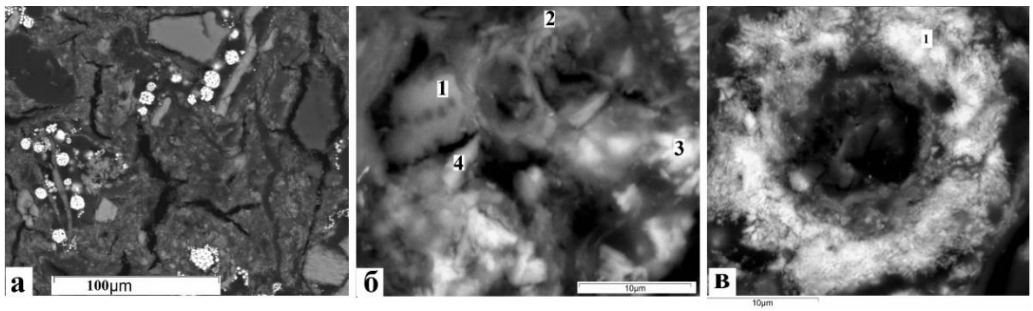


Рисунок 4.7 — Микрофотографии донных отложений, выполненные с использованием СЭМ Mira 3 Tescan а - общий план сапропелевой залежи, б - 1 створки диатомовых водорослей, 2 - призматические выделения арагонита, 3- зерна низкомагнезиального кальцита, 4 - зерно кварца, в - крупное выделение низкомагнезиального кальцита

«Широко распространены аутигенные образования: фрамбоидные агрегаты пирита, творожестые выделения низкомагнезиального кальцита в срастании с остатками мортмассы биоты (Рис. 4.4). Размерность частиц алевро-пелитовая. Исходя из морфологии зерен и срастании их с остатками органики, можно предположить, что их аутигенное образование в данном конкретном случае связанно с биохемогеными процессами на дне озера. При разложении органики идёт обильное выделения CO2 в концентрациях достаточных для осаждения карбонатов. Биохемогенный генезис карбонатов так же подтверждается изотопными исследованиями. Кальцит в донных отложениях имеет облегченный изотопный состав углерода, так как образуется в среде с повышенным

содержанием изотопно-легкого CO2 из минерализованного органического вещества» (Strakhovenko et al., 2019).

«Для установления источников поступления минерального материала для сапропеля озера Песчаного проведено сравнение химического состава субстрата, почв и сапропеля по мультиэлементным спектрам усредненных значений изученных элементов, нормированных к значениям концентраций элементов в верхней континентальной коре по Wedepolkh K.H. (Wedepohl, 1995) (Рис. 4.8). Сравнение показало, что по химическому составу донных отложений в значительной степени отличаются от субстрата и почв водосбора. Высокие значения Ca, Mn, Sr (в 3 и более раза по сравнению с почвой и субстратом) связанны с аутигенным карбонатообразованием, в котором Ca является основным минералообразующим элементом, а Mn и Sr сопутствующими элементами, которые изоморфно замещают кальций в кальците. Повышенные концентрации Hg в донных отложениях в сравнении с почвой и субстратом объясняются сорбцией ртути органическим веществом (Concentration…, 2021). Содержания остальных изученных элементов в донных отложениях ниже, чем в почвах водосбора и субстрате, что объясняется разубоживанием органическим веществом и карбонатами» (Малов и др., 2023).

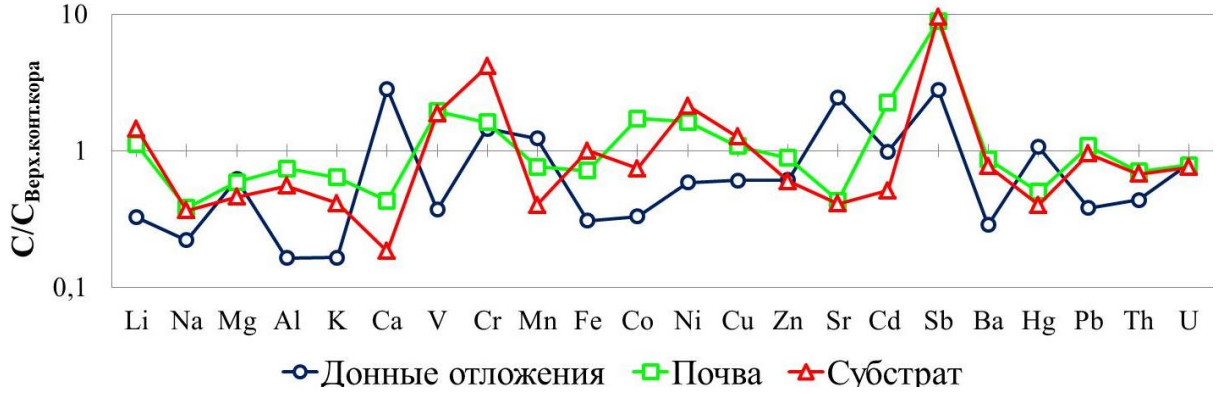


Рисунок 4.8 — Сравнение химического состава субстрата, почв и сапропеля по мультиэлементным спектрам усредненных значений изученных элементов, нормированных к значениям концентраций элементов в верхней континентальной коре (Wedepohl, 1995)

«Для уточнения вклада различных компонентов в формирование сапропелевой залежи проведен кластерный анализ геохимических, биологических аналитических данных: потери при прокаливании при температуре 550°C (ППП), содержаниям

макро- и микроэлементов сапропелей, элементный состав органического вещества (Рис. 4.9) (32 пробы по 26 элементам). В результате кластерного анализа R-типа, который выявляет корреляционные связи между заданными параметрами, выделилось 3 основные группы, характеризующиеся положительными внутренними связями. Положительная корреляция внутри группы данных элементов (Na, K, Al, Fe, Ni, Cu, Cr, Co, Pb, Th, U и др.) и их отрицательная связь с ППП указывает на то, что данная подгруппа элементов имеет аллохтонный источник происхождения, т.е. приносимый с водосбора (макроэлементы являются минералообразующими для минералов обломочной фракции - силикаты, алюмосиликаты Mg, Fe, Na, K, остальные - рассеянными). Планктон, являющийся важнейшим первичным продуцентом органического вещества в озере Песчаное, определяет высокую корреляцию между ППП и C, H, S» (Малов и др., 2023).

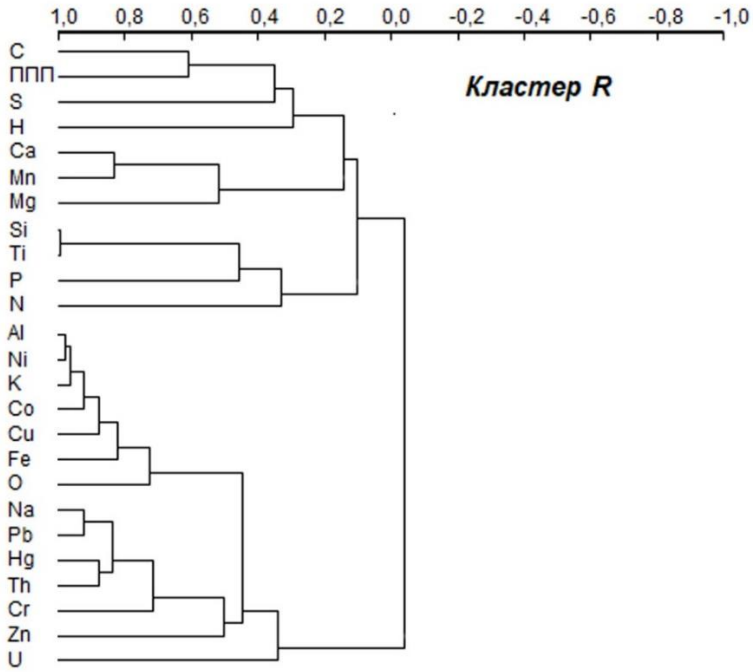


Рисунок 4.9 — Дендрограмма кластерного анализа R-типа для донных отложений.

«Положительная корреляция Ca и элементов карбонатофилов (Sr, Mg, Mn) связана с наличием аутигенных кальцита и арагонита. Данная группа элементов имеет положительную связь с ППП и C, H, S, что можно объяснить наличием в составе карбонатов C, а также активным участием в их образовании биоты и, следовательно, их биохемогенным и биогенным генезисом. Тесная положительная

связь Si с Ti, и их положительная корреляция с N и P объясняется двойственным генезисом Si. В донных отложениях основными источниками кремнезема кроме кварца и полевых шпатов, являются аморфные выделения кремнезёма, связанные с наличием кремнеземистой биоты (створок диатомей) (Concentration…, 2021). ИК спектроскопия показала, что 60% кремнезёма имеет биогенное происхождение (створки диатомовых водорослей) и лишь 40% Si связанно с терригенным материалом (Даниленко и др., 2019)» (Малов и др., 2023).

«Обобщив вышеперечисленные данные можно сказать, что формирование сапропелевой залежи шло за счет автохтонного осадочного материала на фоне поступления обломочного материала с площадей водосбора. Наиболее минерализованный (минерально-органогенный кремниевый) сапропель распространён в северной части озера и занимает среднюю часть залежи, выклиниваясь ближе к центру озера. С северо-восточной стороны озера протекает река, которая при высоких уровнях воды впадает в озеро, что влечет за собой повышенный приток терригенных частиц кварц-полевошпатового состава и обогащением кремнезёмом обломочной фракции сапропелевых толщ. Основную часть запасов сапропеля в озере Песчаном составляет органоминеральный кальциевый сапропель с зольностью 36–50 %, сформированный в результате протекания трех главных процессов: накопления автохтонного органического вещества, образования аутигенных карбонатов и поступления обломочного материала. Суммарные запасы углерода в сапропелевой залежи равны 113,21 тыс. тон. Из них - 104 тыс. тонн — это углерод, захоронённый в органической части, 8,82 тыс. тонн – углерод, захоронённый в минеральной части и 0,39 тыс. тонн – углерода, растворённого в воде в виде преобладающего гидрокарбонат иона. Поступление и захоронение углерода в озере определяется двумя процессами: осаждение автохтонного органического вещества и образования аутигенных карбонатов. Аутигенные карбонаты, формирующие сапропелевую залежь, также вносят вклад (до 7,7%) в захоронение углерода» (Малов и др., 2023).

Пример подсчёта запасов углерода в сапропелевых залежах **оз. Камбала, оз. Нижнее, оз. Качкульня**

Поскольку характеристики вод и почв водосборных площадей детально рассмотрены в статьях (Геохимическая…, 2016; Генезис органоминеральных…, 2019; Страховенко и др., 2013) и описаны по той же схеме, что и для оз. Песчаное, рассмотрим только донные отложения озёр, а также объединим их в группы по схожему составу сапропеля. Озерные котловины (оз. Камбала, оз. Нижнее, Оз. Качкульня) сформировались суффозионно-просадочным образом в межгривном понижении, все озёра малые, бессточные, мелководные. Средняя мощность сапропеля – 1,2 м.; 1,5 м.; 0,9 м. соответственно. Структурно-морфологические и текстурные характеристики одинаковы для всех озёр: структура тонкозернистая, орехово-комковатая, текстура массивная, сапропель табачного цвета с сильным запахом сероводорода.

Минеральный состав обломочной фракции донных отложений определяется наличием кварца, полевых шпатов, слюд, хлорита, акцессорных минералов. Обломки минералов имеют пелитовую размерность, слабоокатаны и хорошо сортированы, не изменены. Широко распространены аутигенные образования: фрамбоидные агрегаты пирита, створки диатомовых водорослей. Вертикальное распределение макроэлементов (Ca, Si, K, Al и др.) равномерно для каждого озера, в каждом озере представлен только один тип и класс сапропеля (таблица 4.4). По составу сапропели относятся к кремниевому типу. Озёра различаются по количеству органического вещества: Оз. Камбала – 62%, оз. Нижнее – 60%, Оз. Качкульня – 83%. Содержание углерода в озёрах 26,70%, 33,98%, 43,30% соответственно. Запасы углерода для данных озёр представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 Запасы углерода в исследованных озёрах

Озеро	Площадь озера, га	запасы $C_{орг}$ тыс. тон	запасы $C_{карб}$ тыс. тон	Тип и класс сапропеля
Оз. Нижнее	52	94,6	0,39	Органо-минеральный Si
Оз. Качкульня	90	110,4	0,34	Органогенный смешенный
Оз. Камбала	337	196,5	3,45	минерально-органогенный Si

Для стандартизации и возможности сравнения с другими объектами, депонирующими углерод, расчёты углеродного бюджета остальных озёр производились на единую площадь (1Га) (Таблица 4.6), для расчёта брались данные

по средней мощности донных отложений, усредненное значение зольности, влажности, углерода в каждом озере отдельно. Статистические данные следующие: средний углеродный бюджет 1581 т/га, медиана 1463 т/га, минимум 187 т/га, максимум 3516 т/га, стандартное отклонение 780 т/га.

Таблица 4.6 Углеродный бюджет (тС/га) для исследуемых озёр

Озеро	Бюджет С, т/га	Озеро	Бюджет С, т/га
Щучье Базовое	1285	Щучье-Л	1008
Качкульня	3516	Бол. Кайлы.	2072
Ярголь	2842	Рублево	1329
Нижнее	2806	Золотое	1172
Лайское-1	1428	Бергуль	1462
Подкова	1463	Танатар 4-й	1525
Бол. Курган	894	Б. Кайлы	1120
М.Минзелинское	1400	Казатово	2834
Сарбалык	2056	Бильгень	2949
Бугристое	1783	Зерлюколь-нур	489
Песчаное	1117	Петухово (сев)	246
Яково	2646	Петухово у д.Северка	1758
Барчин	1851	Танатар 6-й	1572
Аргамджи	2067	Бирюзовое	1024
Кайлы	1920	Иткуль	593
Мал. Тархатинское	1565	Красное	564
Камбала	1944	Канкуль	593
Круглое	1701	Игисту-Коль	528
Суеток	1428	Кусган	382
Куклей	2282	Кротова Ляга	187
Демкино	1157		

На рис. 4.10 представлена теплокарта углеродного бюджета донных отложений озёр относительно типов седиментогенеза и зольности. На тепловой карте наблюдается закономерное снижение углеродного накопления с ростом зольности. Максимальные значения характерны для органогенных осадков в условиях гумидного седиментогенеза. В аридных и нивальных зонах при высокой

зольности значения бюджета минимальны, что свидетельствует о низкой органической продуктивности и преобладании минеральной фракции.

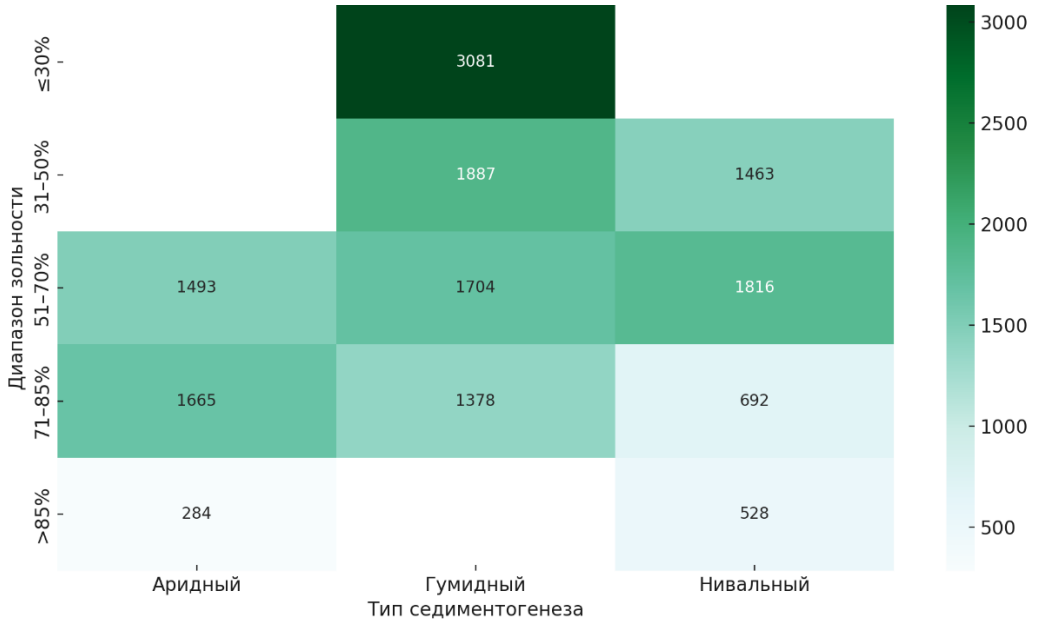


Рисунок 4.10 — Теплокарта углеродного бюджета донных отложений озёр относительно типов седиментогенеза и зольности.

Проведём сравнение углеродного бюджета сапропелевых залежей озёр с бюджетом углерода для торфов юга Западной Сибири. Углеродный бюджет в торфах, как и в сапропеле, преимущественно определяется мощностью отложений. Но в отличие от сапропеля плотность торфа имеет больший диапазон значений (41-157 г/дм3 для олиготрофных болот) (Головацкая, 2013). Средние запасы углерода в торфах болот Западной Сибири составляют 1070-1180 т/га (A high-resolution…, 2004; Головацкая, 2013), что значительно ниже полученных данных по запасам углерода в сапропелевых залежах исследуемых озёр (1525 т/га). Связано это с меньшей плотностью торфа относительно сапропеля. Но общий бюджет углерода в торфах Западной Сибири намного выше, чем в сапропелевых отложениях, из-за меньшей площади акватории озёр.

На территории Новосибирской области разведано 152 месторождения сапропеля с общими запасами сапропеля более 75 млн. т. (Росляков и др., 2013; Геохимическая…, 2016). В 2012-2014 годах в рамках интеграционного проекта (интеграционный проект № 52.125) актуализированы архивные данные (1950-2006)

по геологоразведочным работам на сапропель в Новосибирской области. Результатом работ стала первая для Новосибирской области ГИС-карта месторождений сапропелевых залежей с учтенными запасами и ресурсами минерального сырья на 01.01.2013 г. и актуализированная база данных по месторождениям сапропеля Новосибирской области. Общее содержание органического вещества в сапропелевых залежах месторождений Новосибирской области изменяется от 92 % до 14 %. Встречаются все основные типы и классы сапропелей (Рис. 4.11) (Росляков и др., 2013; Геохимическая…, 2016).

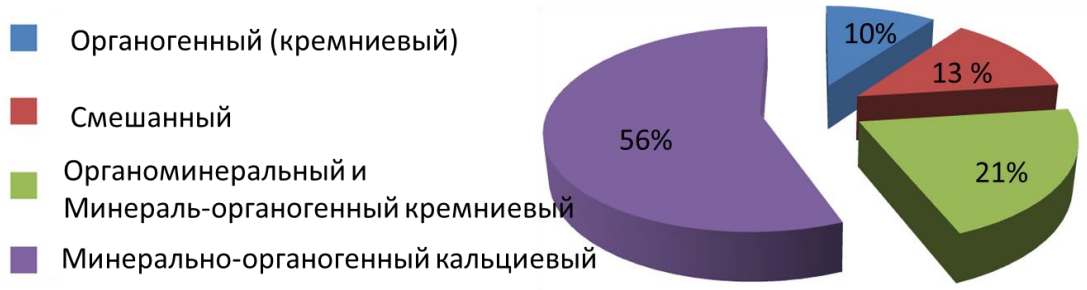


Рисунок 4.11 — Диаграмма соотношения типов сапропелевых месторождений Новосибирской области (по 152 месторождениям).

Минеральная составляющая донных осадков, согласно рентгеноструктурному анализу, представлена довольно постоянным набором основных минералов: кварц, плагиоклаз, калиевый полевой шпат, кальцит. В виде второстепенных минералов присутствуют: пирит, слюды, гидрослюды, хлориты, доломит. В сапропелевых отложениях содержится большое количество микроэлементов (Co, Mn, Cu, B, Zn, Br, Mo, V, Cr, Be, Ni, Ag, Sn, Pb, As, Ba, Sr, Ti, Br, P и др.), которые концентрируются минералами обломочной фракции, за некоторым исключением. Автором работы дополнены данные по новым месторождениям сапропеля и подсчитаны запасы углерода во всех месторождениях сапропеля (3129 тыс. т.), а также проведена оценка углерода в прогнозных ресурсах сапропеля Новосибирской области (220000 тыс. т.).

ГЛАВА 5 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ МАЛЫХ ОЗЁР ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Исследования глобальной эмиссии микроэлементов в атмосферу, выполненные разными учеными на протяжении более 50 лет (Nriagu, 1989; Kabata-Pendias, 2001), показали, что «почти все промышленные производства приводят к антропогенному рассеиванию элементов в окружающей среде. Особую тревогу вызывает обогащение биосферы такими элементами как ртуть, кадмий, свинец, в силу их особой токсичности и стремительности нарастания поступлений в 20 веке» (Nriagu, 1989; Kabata-Pendias, 2001; Янин, 2020). Так, например, исследования взвеси из льдов «Арктики выявило, что кадмий, ртуть, свинец в составе аэрозолей и мелкодисперсных частиц способны переносится на дальние расстояния, выпадая на значительных расстояниях от источников загрязнения и создавая повышенные концентрации в отдаленных регионах от промышленных центров» (Soininen et al., 2005; Шевченко, 2006). «Вследствие антропогенный эмиссии в локальном, региональном и глобальном масштабах за прошлое столетие поступление ртути в окружающую среду увеличилось от 2 до 20 раз» (Янин, 2020). «Hg образует стабильные комплексы с органическими лигандами, особенно с серой (аминокислоты, окси- карбоновые кислоты и др.), и высокомолекулярными органическими веществами (ОВ) типа фульво- и гуминовых кислот. Значительная часть ртути находится в составе взвешенных частиц и в виде метилированной ртути, последняя форма может формироваться как химическим, так и микробиологическим путем» (Increasing…, 1992). «В природную среду (почва, вода, воздух) Cd попадает вследствие широкого его применения в различных отраслях хозяйственной деятельности. Использование фосфатных удобрений привело к широкому загрязнению им окружающей среды в глобальном масштабе» (Моисеенко, Гашкина, 2018).

Поскольку ненарушенные стратифицированные донные осадки содержат «исторические записи» прошлых химических условий предшествующих эпох, возможно сравнить и сопоставить существующие условия с доиндустриальными фоновыми уровнями с учетом факторов, определяющих геохимический состав формирующихся сапропелей, на основе обширного фактического материала для разных озерных систем разных ландшафтных зон Васюганской равнины, Барабинской равнины, Кулундинской низменной равнины и гор Алтая. Стратифицированное изучение донных отложений и сравнение верхних (субаквальных слоев 0-20 см) с более глубоко залегающими горизонтами осадка позволяет выявить изменения в поступлении элементов с учетом их перераспределения, происходящие на начальной стадии диагенеза. В предыдущих главах автором данной рукописи показаны особенности вещественного состава сапропелевых озерных систем и установлены в них запасы углерода. В этой главе на основании массива аналитических данных по вертикальному распределению микро- и макроэлементов в сапропелевых залежах, собранного научным руководителем при участии автора с использованием их различных характеристик, проведена количественная оценка поступления элементов Pb, Cd, Hg в сапропелевые отложения за последние 200 лет (Страховенко и др., 2014; Геохимическая…, 2016; Генезис органоминеральных…, 2019; Spatio-temporal…, 2022).

5.1 Латеральное распределение микроэлементов

При сопоставлении концентраций элементов в донных осадках озер различных ландшафтных зон юга Западной Сибири, расположенных в условиях разных типов седиментогенеза, с составом верхней континентальной коры установлено избыточное накопление в процессе современного осадкообразования Cd, Sb, U, P, Cr, Ni, Cu в ландшафтных зонах и Ca, Sr, Mg в донных осадках озер при аридном типе седиментогенеза и значительное обеднение K, Al, Si, Ti, Th, Ba, Pb, Hg, а также Fe, Co (рисунок 5.1).

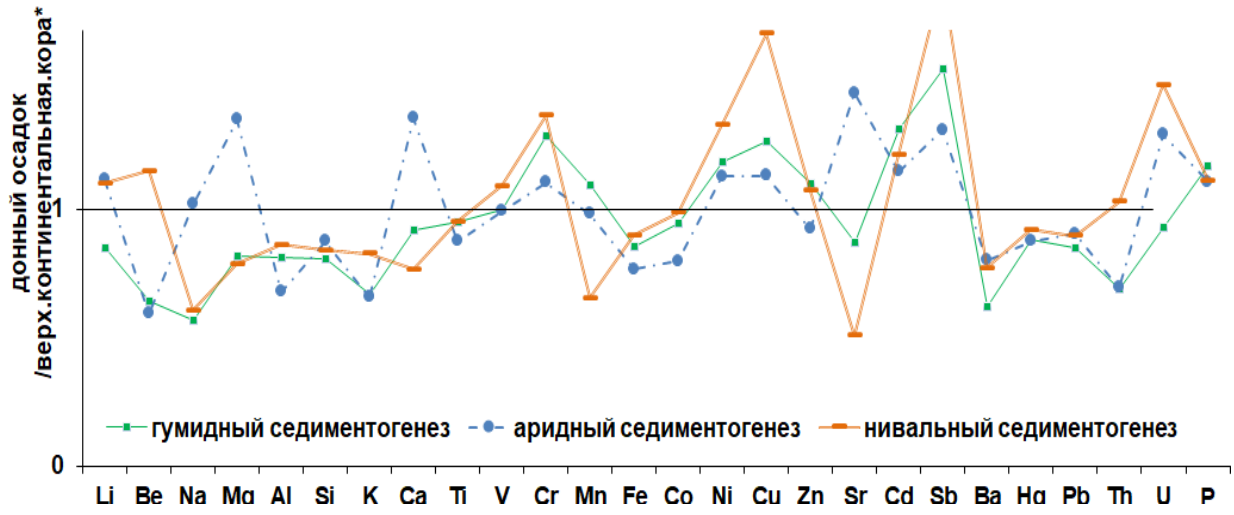


Рисунок 5.1 — Усредненные содержания элементов в донных осадках озер формирующихся в условиях различных типов седиментогенеза, нормированные к значениям концентраций верхней континентальной коры

«Выявленное постепенное обогащение донных отложений с севера на юг Ca, Sr, Mg, Na, Li, U и меридиональная зональность уменьшения (т.е. обратная) в донных отложениях с севера на юг Zn, Cd, Sb» (Spatio-temporal…, 2022). «Сравнение данных по средневзвешенным значениям содержаний изученных элементов в донных осадках озер локализованных на территориях с разным типом седиментогенеза, показало, что в донных осадках всех типов седиментогенеза зафиксированы более высокие концентрации Sb, Ca, Mg, Sr за исключением степного и Cd – лесостепного ландшафтов Барабы относительно их почв водосборных площадей. Содержание остальных элементов донных отложений находится на том же уровне, что и содержание этих металлов в почвах водосборных площадей» (Spatio-temporal…, 2022).

На основании статистической обработки данных о распределении 28 химических элементов в донных отложениях 91 озера в результате кластерного анализа R-типа установлены (при вероятности 95%) корреляционные связи между макро- и микроэлементами с группировкой их, в основном, в 3 кластера с высокими положительными коэффициентами корреляции внутри групп: группы, связанные с составом терригенных элементов, карбонатофилы и элементы, располагающиеся особняком (рисунок 5.2).

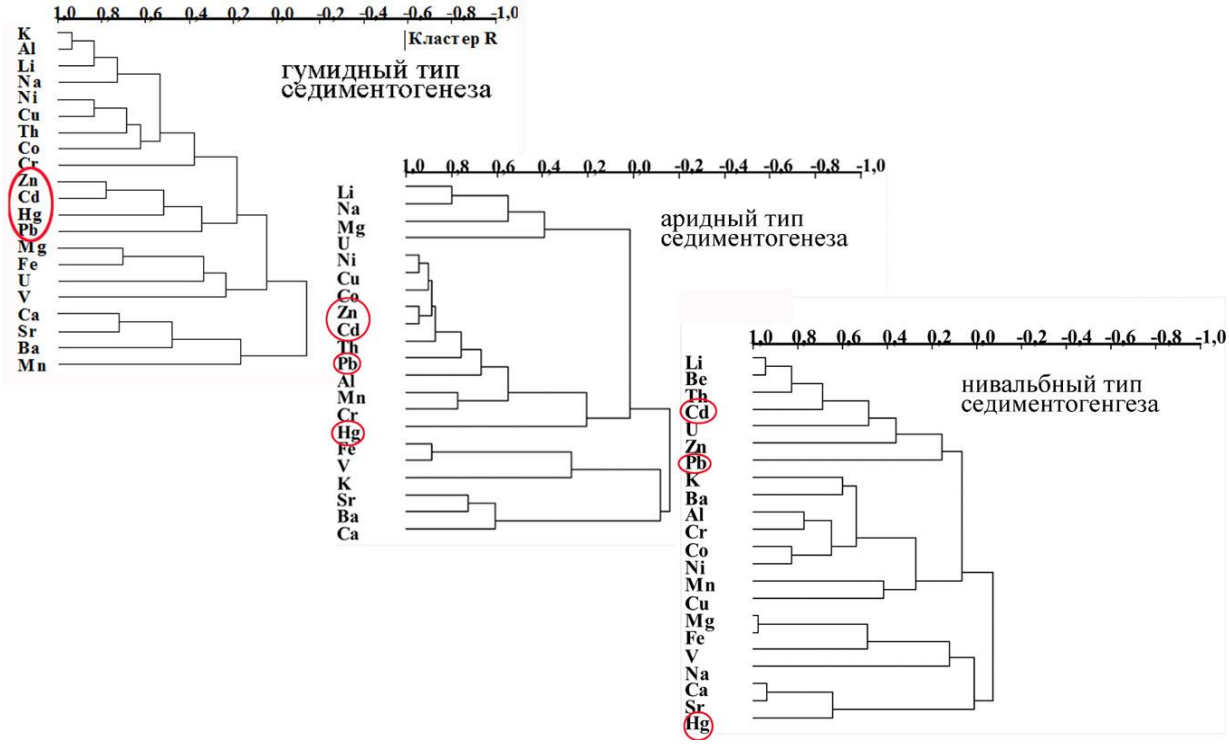


Рисунок 5.2 — Дендрограмма кластер-анализа R-типа, где использованы аналитические данные по содержаниям макро- и микроэлементов (Si, Ca, Na, K, Al, Mg, Fe, Ti, P, Mn, Sr, Ba, Pb, Cd, V, Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Hg, U, Th) в донных отложениях разных типов и классов (органо-минеральный, минерально-органогенный, минерализованный), сгруппированных по территориям водосбора с разными типами седиментогенеза. Овалом выделены элементы Pb, Cd, Hg.

Для сапропелевых отложений озёр, расположенных в условиях различных типах седиментогенеза, преобладания в терригенной фракции минералов разного состава в отдельно взятом озере (полевых шпатов, слюд, иллита, кварца, актинолита, хлорита, акцессорных минералов) определяет корреляцию Al, K, Na, Th с железом, хромом, никелем, кобальтом, медью, и другими элементами, присутствующих в этих фазах в виде изоморфных примесей. На всех диаграммах четко выделяется карбонатофильная группа Ca- Sr, с вариациями Mn, Ba для разных типов седиментогенеза. Элементы группы (Ca, Sr ± Mn, Ba,) входят в состав аутигенных карбонатов, либо образуют собственные, находящиеся в парагенетической ассоциации с ними минералы – барит, гипс» (Spatio-temporal…, 2022). В озерах, локализованных в условиях гумидного седиментогенеза, выявлена прямая корреляция концентраций элементов (Cd± Zn, Pb, Hg) с количеством органического вещества в донных осадках. В донных осадках других озер (Cd, Pb, Hg) ведут себя по-разному. В условиях нивального седиментогенеза в донных

осадках ртуть попала в группу карбонатофильных элементов, образуя тесную положительную корреляцию с Ca и Sr, и, возможно, связано это с травертинообразованием (низкотемпературный гидротермальный процесс) по крупным разломным зонам, так как озёра Улаганской долины и Укокского плоскогорья находятся в различных рудных металлогенических зонах (Travertines…, 2023). В озерах, локализованных в условиях аридного и нивального седиментогенеза, в донных осадках (Cd, Pb) на дендрограмме кластер-анализа R-типа занимают обособленное положение. Учитывая влияние минерального и биогенного состава на концентрирование или разубоживание элементов в определенном типе, классе донного осадка, рассмотрим вертикальное распределение (Cd, Pb, Hg) в них.

5.2 Вертикальное распределение микроэлементов

Вертикальное распределение элементов в отдельно взятых озерах, озерных системах разобрано научным руководителем и автором в целом ряде статей и материалов совещаний (Страховенко и др., 1999; Закономерности…, 2010; Формирование…, 2017; Страховенко и др., 2023; Spatio-temporal…, 2022).

Ранее установлено, что «для главных породообразующих элементов, зависящих от преобладания в составе терригенной фракции (Al, Ba, Th и в меньшей степени Si, K, определяется количеством полевых шпатов, обломочных силикатов); аутигенных новообразованных карбонатов (Ca, Sr, Mn), распределения изменяются в противоположных направлениях, а суммарный тренд закономерно меняется в зависимости от количества органического вещества (обратное количество от зольности). Важно отметить, что соотношение биохемогенного карбоната и минералов терригенной фракции в формирующихся донных отложениях конкретного озера слабо зависит от ландшафтных условий, а определяется развитием определенных видов биоты в конкретном озере» (Concentration…, 2021).

Анализ вертикального распределения Cd, Hg, Pb в сопоставлении с другими макро и микроэлементами в обобщенных колонках изученных озер по типам седиментогенеза с учетом разных ландшафтных зон юга Западной Сибири, озерам

отдельных озерных систем позволил выявить сходства и отличие их распределения от других микроэлементов. В основном для большой части изученных элементов вертикальное распределение не характеризуется каким-либо трендом: верхние и нижние горизонты донных отложений практически не отличаются по содержаниям (Cu, Cr, Ni, Co, Mg, Be, Sb, V, Li, и другие)» (Spatio-temporal…, 2022). Примерно такое же распределение характерно для Pb в донных осадках в различных ландшафтных зонах, за исключением ряда озер, расположенных в высокогорной и среднегорной зоне Алтая (нивальный тип седиментогенеза) и в большой части озер лесостепного ландшафта (гумидный тип седиментогенеза). В этих ландшафтах вертикальное распределение Pb, Cd, Hg характеризуется увеличением их концентраций к границе раздела сред «донный осадок-вода» (рисунок 5.3).

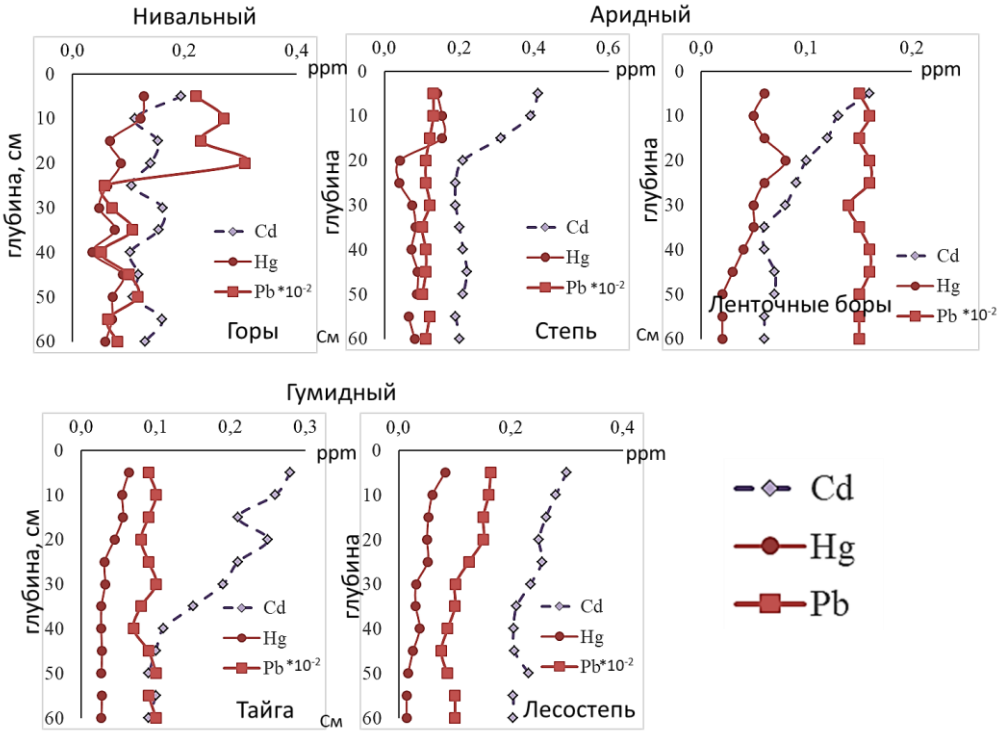


Рисунок 5.3 — Вертикальное распределение усредненных содержаний Cd(мг/кг); Hg(мг/кг) *10 и Pb (мг/кг) $*10^{-2}$ в разрезах сапропелевых залежей, формирующихся в условиях различного типа седиментогенеза.

Данные вариации в распределении микроэлементов в вертикальном разрезе донных осадков могут быть обусловлены как естественными, так и антропогенными факторами. Из естественных причин главными являются различия в литологическом составе, что и подтверждается распределением Ca, Al,

количеством органического вещества. Значимо более высокие содержания Cd и иногда Hg в верхней части профилей донных осадков и почв их водосборных площадей относительно нижележащих горизонтов можно попытаться объяснить естественными причинами, а именно их связью с полиамидами фульвокислот органического вещества. «Из всех химических элементов Cd и Hg обладают максимальной способностью к ковалентному связыванию с белками» (Кутепов, Кутепова, 2003). Фитопланктон и макрофиты способны накапливать в своем составе широкий спектр микроэлементов, переводя их растворимые формы в труднорастворимые, которые после отмирания захораниваются в донных отложениях. Значительную роль в поступлении этих элементов в донные осадки могут играть макрофиты. Их прибрежные заросли создают благоприятные условия для осаждения взвешенных веществ, часть седиментов, скапливаясь на поверхности растений, образует органо-минеральные комплексы, которые затем поступают в донные отложения. Так, например, для озер, локализованных в пределах гумидного и аридного седиментогенеза, уровень накопления свинца в мортмассе макрофитов изученных озер находится в пределах от 0,92 мг/кг до 2,29 мг/кг, кадмия от 0,08 до 0,18 мг/кг (Spatio-temporal…, 2022). Среди макрофитов приоритетными накопителями этих металлов являются харовые и нитчатые водоросли. Концентрация в отдельных экземплярах свинца может доходить до 23 мг/кг, кадмия – до 1,3, что в 1,2-1,5 раза выше, чем в плавающих растениях, и в 1,7-2,4 раза выше, чем в воздушно-водных. «Корневая система, как жесткой водной растительности – тростника, так и мягкой – рдеста накапливает значительно больше данных металлов, чем надводная часть и стебли растений» (Мукашева, Лопарева, 2013). По экспериментальным данным «наиболее интенсивно вовлекаются в миграционные циклы Zn2+ и Cu2+, а в меньшей степени – Pb2+, Cd2+» (Создание консорциума…, 2018). «Изменчивость форм существования кадмия в процессе миграции запрограммирована способностью Cd легко менять свое состояние под воздействием факторов среды» (Кутепов, Кутепова, 2003). Поэтому при разложении органического вещества Cd и Hg попадают в поровые воды и включаются снова в миграционный процесс. Работы по изучению

поведения кадмия в компонентах природной среды показали, что «пока не нарушен баланс естественных геохимических процессов, геохимия кадмия близка к природной и проявляется его сродство с цинком и ртутью» (Кабата-Пендиас, 2005; Кутепов, Кутепова, 2003; Глазовская, Горбунова, 2003). Следовательно, в разрезах донных осадков с увеличением содержаний Cd должно фиксироваться увеличение и Zn к границе вода-донный осадок, что и наблюдается в кернах основной части озер. Но также выявлены озера в лесостепной зоне и южной тайге, в сапропелевых залежах которых, где доминирующей первичной продукцией является планктоно-макрофитный вид, со значительным увеличением концентраций Cd и Hg к границе вода-донный осадок, содержания Zn в верхних и нижних горизонтах донных отложений не отличаются. «Важно отметить, что из элементов с переменной валентностью иногда Mn связан с аутигенными новообразованными карбонатами и, следовательно, можно рассматривать распределения его содержаний в результате диагенеза. В стратифицированных колонках донных отложений в виду дефицита свободного O2 в придонной воде ионы растворимого Mn2+ и Fe2+ обычно мигрируют до границы вода-дно. В изученных озерах дефицит свободного O2 подтверждается изменением Eh, которое происходит уже в самых верхних сантиметрах осадка, т.е. фактически в наилке и активным развитием процессов минерализации органического вещества в анаэробных условиях на дне озер, которое описано выше. При этом графики вертикального распределения содержаний Mn со значительным увеличением его концентраций к границе вода-донный осадок выявлены во многих сапропелевых залежах изученных озер» (Страховенко и др., 2014, 2023; Gas'kova et al., 2017; Spatio-temporal…, 2022). Следовательно, вероятной причиной более высоких концентраций Cd и иногда Hg в разрезах большинства изученных озер служит увеличение поступления этих элементов со временем, связанное с увеличением современного регионального уровня их фоновых концентраций в биосфере Северного полушария Земли. «Согласно многочисленным публикациям, максимальные уровни техногенного обогащения окружающей среды характерны для ртути и свинца и интенсивное накопление в окружающей среде наблюдается именно для Pb, Hg, Cd» (Глазовская,

Горбунова, 2003; Кабата-Пендиас, 2005; Даувальтер и др., 2015). «И лишь в начале 21 века поступление данных элементов в объекты окружающей среды значительно снизилось» (Даувальтер и др., 2015).

Сравнение данных по средневзвешенным значениям абсолютных содержаний Cd, Hg, Pb в донных отложениях озер, локализованных в ландшафтных зонах на территориях с разным типом седиментогенеза, показало постепенное их уменьшение от кремниевого сапропеля к кальциевому: Cd — во всех изученных озёрах и Hg — за исключением степного ландшафта. Для Pb зафиксирован сходный тренд уменьшения абсолютных содержаний от кремниевого сапропеля к кальциевому, за исключением всех озер, расположенных в степных ландшафтах Сибири.

5.3 Весовое распределение микроэлементов

Огромные ресурсы сапропелей, состав их органической и минеральной частей позволяют считать сапропелевые отложения ценным полезным ископаемым, пригодным для использования в различных отраслях народного хозяйства. Традиционное использование сапропеля связано с сельским хозяйством и медициной (бальнеологией). В связи с этим остро стоит вопрос о качестве сапропелевого сырья и его безвредности для человека. Сделана попытка количественно оценить увеличение массового и/или объемного пула данных элементов-поллютантов (Cd, Hg, Pb) в верхней части сапропелевых залежей изученных озер.

Мировой подход в изучении качества сапропелевого сырья подразумевает оценку концентраций этих элементов на сухое вещество, но сам учёт запасов, добыча сапропеля и его использование производятся в естественном виде (сапропель с естественной влажностью 60%) (Инструкция…, 1988; Подтуркин и др., 2007), с широким диапазоном зольности, а следовательно, и плотности отложений, в связи с чем фактическая массовая доля и нагрузка элементов-поллютантов значительно меняются. Согласно инструкции по разведке озёрных месторождений сапропеля и методическим рекомендациям по подсчету запасов

металлических и неметаллических полезных ископаемых для корректного расчёта доз внесения сапропеля применяется подход пересчёта сухого количества вещества с учётом влажности и плотности (ГОСТ Р 54000–2010, 2011; ГОСТ Р 56219–2014, 2015; ГОСТ Р 54519–2011, 2012). Для проведения расчётов в каждом модельном озере (42 озера) разрез донных отложений разделен (по данным датирования) на две части: верхняя – последние 100 лет (как промежуток времени с максимальным антропогенным поступлением) и нижняя – промежуток 100-200 лет. Методика расчёта рассмотрена в главе 2.5 данной диссертационной работы.

Методика пересчета на объем с учетом плотности и влажности сапропеля важна для подсчета запасов сапропеля как полезного ископаемого. Обладая большей удельной поверхностью, мелкодисперсные фракции (частиц <0.01 мм и, особенно, <0.001 мм) активно фиксируют на поверхности своих частиц гидратные комплексы, не разрушаемые в процессе термического высушивания при определении естественной влажности. Объемный вес отложений является прямой характеристикой рыхлости структуры осадков, отражая плотность прилегания частиц донных отложений друг к другу и объем пустот между ними. Низкий объемный вес свидетельствует о рыхлой структуре и небольшой плотности образца, соответственно, свободный объем в таких отложениях заполнен водой. Рост значений количества органического вещества сопровождается снижением объемного веса осадка, так как размерность частиц органического вещества преимущественно <0.01 мм.

Основными показателями, влияющими на массовое содержание элементов, являются: концентрация рассчитываемого элемента в пробе, влажность и зольность. В целом, усредненные содержания элементов в до (35-60 см) – и постиндустриальные (0-35 см) периоды их накопления в донных отложений озер юга Сибири в разных типах седиментогенеза и их отношения между собой меньше 1. Это определяется изменением влажности, которое полностью соответствует представлениям о временных преобразованиях в донных осадках озёр, а именно: уплотнению осадка со временем. А вот вариации зольности по керну могут сильно отличаться даже для донных осадков озер, расположенных в пределах одной

водосборной площади. В большинстве озер в результате деструкции органического вещества и образования аутигенных минералов зольность от границы раздела сред вода-донный осадок вниз по разрезу возрастает. Но встречаются озера, в которых в современных условиях накопление органического вещества резко уменьшилось, а, следовательно, и меняется распределение породообразующих элементов (Al, Ca, Ti, Fe, Na, K). Тогда и массовое содержание этих элементов может сильно меняться по разрезу. Для большей части микроэлементов массовое содержание в верхней части разреза либо ниже, чем в нижней, либо равно 1. А вот содержание элементов потенциальных поллютантов (Cd, Hg, Pb) в верхней части разреза выше, чем в нижней.

Сравнительный анализ сводных графиков расчётных весовых содержаний Cd, Hg, Pb с учетом геохимического состава сапропелей показал, что при переходе от абсолютных концентраций (мг/кг) к объемной массе элемента (г/м³) выявленный ранее тренд постепенного уменьшения концентраций Cd, Hg, Pb от кремниевого сапропеля к кальциевому выражен более контрастно во всех изученных озерах и в основном объемный вес изученных элементов в нижней части разрезов выше, и связано это с большей плотностью и зольностью донных отложений по мере его уплотнения (Рис. 5.4).

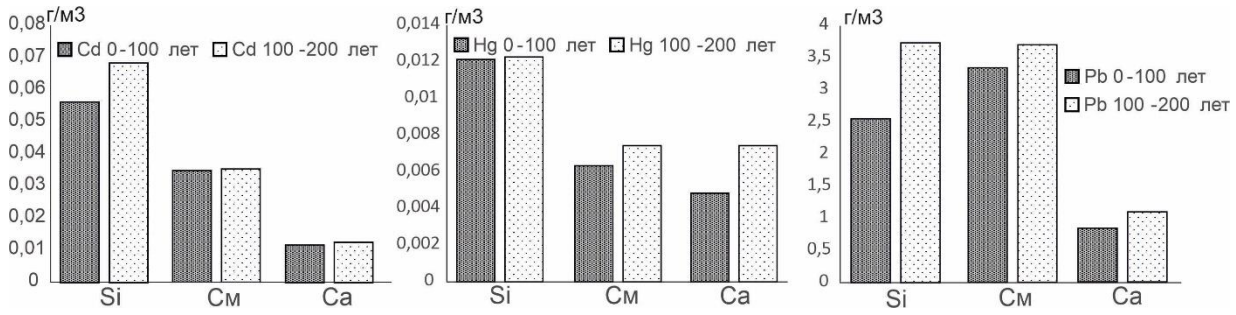


Рисунок 5.4 — Диаграмма массовых содержаний элементов – потенциальных поллютантов (Cd, Hg, Pb) в верхней и нижней частях разрезов для сапропелей разных классов.

Выявленное влияние минерального и геохимического состава на абсолютные весовые содержания Cd, Hg, Pb в сапропелевых залежах, а именно то, что наименьшие абсолютные весовые содержания Cd, Hg, Pb характерны для сапропелей кальциевого класса, связано, скорее всего, с преобладанием аутигенных карбонатов в минеральной ассоциации ДО. Наличие карбонатов

способствует уменьшению влажности осадка, так как агрегаты карбонатов имеют значительно большую размерность (>0.01 мм) (Страховенко и др., 2019; 2023; Strakhovenko et al., 2021).

Диаграммы усредненных весовых содержаний элементов Cd, Hg, Pb в донных отложениях озер в до (100 – 200 лет) – и постиндустриальные (0-100 лет) периоды их накопления из разных ландшафтных зон юга Сибири, сформировавшихся в ходе гумидного, аридного и нивального типов седиментогенеза, представлены на рисунке 5.5.

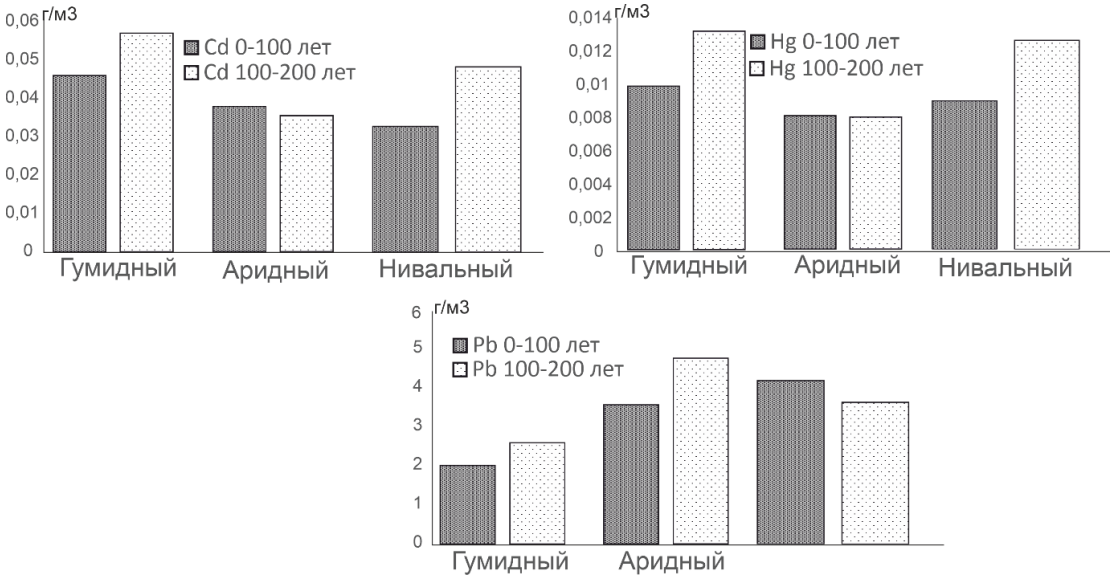


Рисунок 5.5 — Диаграмма массовых содержаний элементов – потенциальных поллютантов (Cd, Hg, Pb) в верхней и нижней частях разрезов для сапропелей озёр, расположенных в различных типах седиментогенеза.

Установлено, что для большинства изученных озер весовое содержание Cd, Hg, Pb в 1 м³ ниже в верхних (постиндустриальных) слоях, чем в нижних (доиндустриальных). Это обусловлено уплотнением осадка с глубиной: нижние горизонты имеют меньшую влажность и большую плотность, что увеличивает массу элемента на единицу объема. Поэтому при пересчете на 1 м³ естественно-влажного сапропеля масса элементов в нижних слоях может оказаться выше физически, даже если их концентрация в сухой пробе ниже. Данный факт принципиально важен для подсчета запасов сапропеля как полезного ископаемого, так как демонстрирует, что современное увеличение концентрации токсикантов (в мг/кг) не всегда ведет к росту их абсолютной массы в единице объема готового

сырья. Из этого можно сделать вывод, что, несмотря на общее мировое увеличение поступления Cd, Hg, Pb в окружающую среду, ухудшения качества сапропелевого сырья не обнаружено. Однако надо учесть, что для целей экологического мониторинга и сравнения "загрязнения" такой подход нивелирует картину. Он показывает не уровень токсичности (опасность зависит от концентрации в потребляемой массе), а общую массу вещества в геологическом теле.

Важно отметить, что в условиях каждого типа седиментогенеза встречаются озера, для которых усредненные весовые содержания элементов в верхней части разреза донных отложений выше, чем в нижней. Рассмотрим на примере озер, расположенных в разных ландшафтах юга Зап. Сибири. Например, оз. Круглое, расположенное в подзоне южной тайги, оз. Б. Кайлы, оз. Бугристое, оз. Нижнее – лесостепь (гумидный тип седиментогенеза Зап. Сибирь), оз. Танатары 6 и 4, расположенные в степной зоне Зап. Сибири, оз. Золотое – ленточный бор (аридный тип седиментогенеза), оз. Подкова – нивальный тип седиментогенеза (Рис. 5.6).

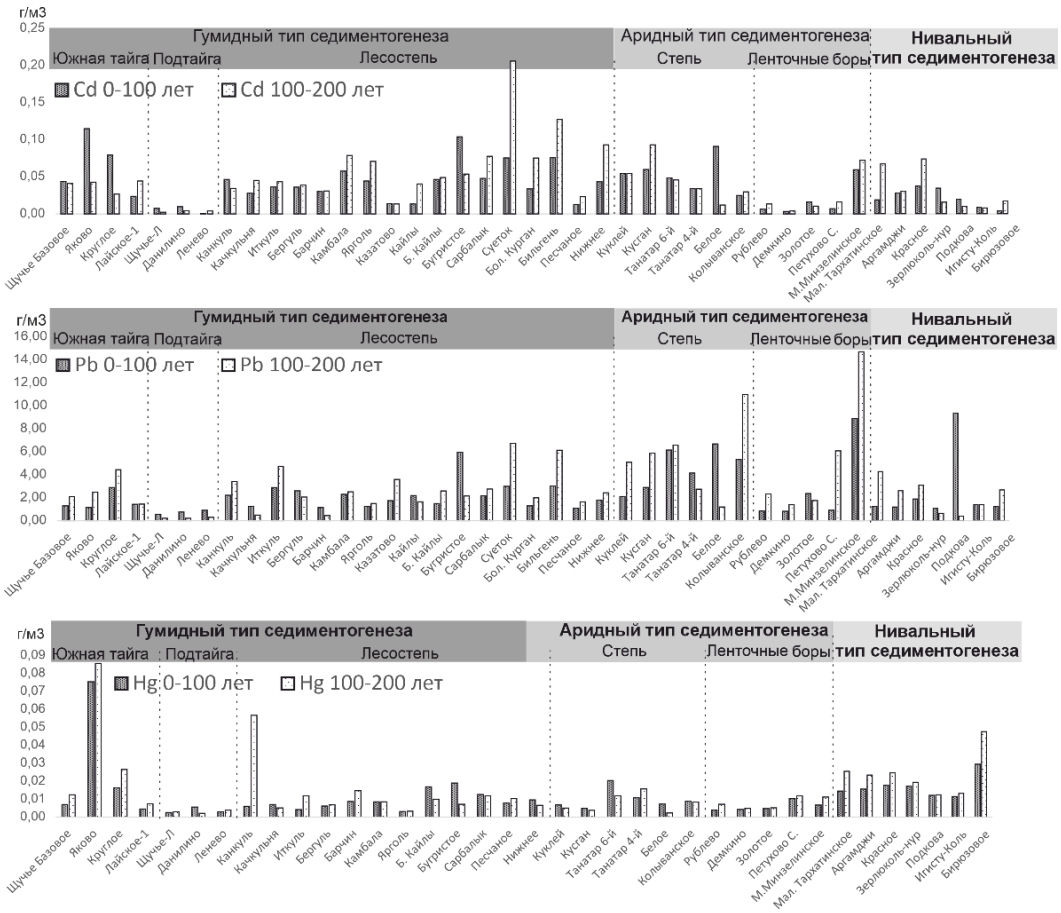


Рисунок 5.6 — Диаграмма массовых содержаний элементов – потенциальных поллютантов (Cd, Hg, Pb) в верхней и нижней частях разрезов для сапропелей озёр, расположенных в условиях различных типов седиментогенеза.

Данный факт свидетельствует о наличии мощных локальных источников поступления этих элементов в современный период, которые способны перекрывать эффект уплотнения осадка. Среди изученных озер именно на берегу таких озер располагаются либо крупные населенные пункты, либо ведутся производственные работы: Б.Кайлы – г. Куйбышев, Бугристое – г. Барабинск, Нижнее – п. Новоульяновка и производство «Сады Барабы», озера Танатар - предприятия по добыче соды, Подкова - база отдыха и площадка размещения узла асфальтирования. Исключением является оз. Золотое, расположенное в ленточном бору. Но в разрезе донных отложений данного озера концентрации Cd и Pb в постиндустриальный период в 5 раз выше, чем в доиндустриальный, а локальный источник не выявлен. Данные озера требуют отдельного внимания как индикаторы точечного антропогенного воздействия.

Для оценки перспективности исследованных озёр как месторождений сапропеля проведена оценка качества сапропеля на соответствие требованиям ГОСТ Р 54000-2010. Сапропели всех исследованных озёр по всем параметрам соответствуют ГОСТ Р 54000-2010. По содержанию тяжёлых металлов сапропель относится к первому классу пригодности. «Сапропели первого класса пригодности применяются под все виды сельскохозяйственных культур, в садоводстве, цветоводстве, лесном хозяйстве, при рекультивации почв, отвалов, благоустройстве и озеленении городских, в том числе и рекреационных, территорий в дозах, рекомендованных с учетом вида культуры, плодородия каждого отдельного поля» (ГОСТ Р 54000–2010, 2011). Из этого можно сделать вывод, что, несмотря на общее мировое увеличение поступления Cd, Hg, Pb в окружающую среду, ухудшения качества сапропелевого сырья не обнаружено.

В ходе выполнения диссертационной работы открыты три новых месторождения сапропеля Новосибирской области, по ним проведены геологоразведочные работы, выполнены подсчёт и защита запасов. На одном из месторождений организована и уже начата промышленная добыча сапропеля, что подтверждает не только ресурсную значимость объектов, но и практическую

применимость полученных научных результатов. Цех глубокой переработки сапропеля представлен на рисунке 5.7.



Рисунок 5.7 — Цех глубокой переработки сапропеля

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На территории юга Западной Сибири, в различных ландшафтных зонах в условиях разного типа седиментогенеза в малых бессточных озёрах формируются донные отложения, представленные сапропелями в широком диапазоне составов.

Скорость осадконакопления от озера к озеру варьирует от 0,8 до 6,4 мм/год как внутри компактно расположенных озер, так и между озерами разных ландшафтов и не зависит от состава донных отложений и типа седиментогенеза (гумидного, аридного и нивального).

В исследованных озёрах юга Западной Сибири активно идут процессы депонирования углерода в донные отложения. Помимо захоронения углерода в виде органического вещества в исследуемых озёрах происходят активные процессы карбонатообразования, за счёт чего часть углерода захоранивается в виде карбонатов. Преобладающей формой захоронения углерода в донных отложениях является органический углерод, даже в высокозольных карбонатных сапропелях доля минерального углерода не превышает 22%.

Средняя скорость депонирования углерода в малых озёрах юга Западной Сибири составляет 4,62±2,9 т/га в год (5,5 т/га в год для озер, локализованных в условиях гумидного типа седиментогенеза, 3 т/га в год для озер, локализованных в условиях аридного типа седиментогенеза, и 3,4 т/га в год для озер, локализованных в условиях нивального типа седиментогенеза), минимальные значения относятся к оз. Кротова ляга (степь, аридный тип седиментогенеза) – 0,5 т/га в год, максимальные — к оз. Яково (таёжная зона, гумидный тип седиментогенеза) - 11,1 т/га в год. Общий объем секвестрации углерода в донных отложениях малых озёр юга Западной Сибири различается как в региональном, так и в локальном пространственном масштабе, не зависит от типа седиментогенеза.

Сравнение со скоростями депонирования углерода в торфах Западной Сибири показало, что озёра быстрее захоранивают углерод за счёт больших скоростей осадконакопления и плотности. Средний бюджет углерода для озёр юга Западной Сибири 1525 т/га, что также превышает средний углеродный бюджет для торфа. Из-за высокой озёрности юга Западной Сибири углеродный бюджет озёр необходимо учитывать в углеродном балансе региона.

Вертикальное распределение микроэлементов в сапропелевых залежах озер характеризуется равномерностью с общей тенденцией хаотичного изменения значений в пределах одного стандартного отклонения. При этом содержания в верхних частях разреза не превышают значений для нижних. Элементами с отчетливо выраженным характером повышения концентраций от нижних к верхним частям разреза являются Cd и Hg во всех ландшафтных зонах Сибири и Pb.

Количественно оценено временное изменение массового и/или объемного пула элементов-поллютантов (Cd, Hg, Pb) в разрезах сапропелевых залежей изученных озер и проведена оценка качества сапропелевого сырья по ГОСТ Р 54000-2010. По содержанию тяжёлых металлов сапропель относится к первому классу пригодности. Средние расчётные весовые содержания элементов - потенциальных поллютантов в донных отложениях: Cd – 0.05±0.05 г/м^3, Hg – 0.01±0.01 г/м^3, Pb - 3±2.7 г/м^3. Для сапропелевых отложений разных типов и классов, формирующихся в условиях всех типов седиментогенеза (гумидного, аридного и нивального), весовое содержание изученных элементов в верхних частях разреза (последние 100 лет) меньше, чем в нижних. Из этого следует, что при общих мировых тенденциях увеличения концентраций тяжёлых металлов в окружающей среде качество сапропелевого сырья не ухудшилось.

Список литературы

1. Бобров, В. А. Лабораторный гамма-спектрометрический анализ естественных радиоактивных элементов : методические разработки / В. А. Бобров, А. М. Гофман. — Новосибирск : Изд-во ИГиГ СО АН СССР, 1971. — 67 с.
2. Бурлин, Ю. К. Литология нефтегазоносных толщ / Ю. К. Бурлин, А. И. Конюхов, Е. Е. Карнюшина. — Москва : Недра, 1991. — 286 с.
3. Верес, Ю. К. Биогенный состав взвешенного вещества в водоемах разного трофического типа / Ю. К. Верес, Т. В. Жукова, А. П. Остапеня // Вестник БГУ. Серия 2: Химия. Биология. География. — 2012. — № 3. — С. 40–44.
4. Взаимосвязь химического состава органического вещества озерных систем и генезиса сапропелей / О. П. Таран, В. В. Болтенков, Н. И. Ермолаева [и др.] // Геохимия. — 2018. — № 3. — С. 269–279. — EDN YTFMWB. — DOI 10.7868/S001675251803007X.
5. Внутриводоемные процессы в долинных водохранилищах различного возраста / Д. В. Ломова, М. Г. Гречушникова, Г. Н. Вишневская [и др.] // Метеорология и гидрология. — 2016. — № 12. — С. 63–74.
6. Гавшин, В. М. 137Cs и 210Pb в озерных отложениях степного Алтая как показатели динамики антропогенных изменений геохимического фона на протяжении XX века / В. М. Гавшин, Б. Л. Щербов, М. С. Мельгунов // Геология и геофизика. — 1999. — № 9. — С. 1331–1341.
7. Генезис органоминеральных отложений озер центральной части Барабинской низменности (юг Западной Сибири) / В. Д. Страховенко, Е. А. Овдина, Г. И. Малов [и др.] // Геология и геофизика. — 2019. — Т. 60, № 9. — С. 1231–1243. — DOI 10.15372/GiG2019093.
8. Геолого-геофизическая модель формирования Калгутинской рудно-магматической системы (Южный Алтай) / И. Ю. Анникова, А. Г. Владимиров, С. А. Выставной [и др.] // Известия Томского политехнического университета. — 2004. — Т. 307, № 4. — С. 38–42.
9. Геохимическая характеристика сапропелей Новосибирской области / В. Д. Страховенко, Н. А. Росляков, А. И. Сысо [и др.] // Водные ресурсы. — 2016. — Т. 43, № 3. — С. 336–344. — DOI 10.7868/S0321059616030160.
10. Гидробиологические условия формирования сапропелей в озерах юга Западной Сибири / Н. И. Ермолаева, Е. Ю. Зарубина, Р. Е. Романов [и др.] // Водные ресурсы. — 2016. — Т. 43, № 1. — С. 79–91. — DOI 10.7868/S0321059616010077.

11. Глазовская, М. А. Полигенетичность почв аридной зоны Средней Азии и Казахстана / М. А. Глазовская, И. А. Горбунова // Известия Российской академии наук. Серия географическая. — 2003. — № 2. — С. 36–42.
12. Головацкая, Е. А. Скорость аккумуляции углерода олиготрофными болотами южно-таежной подзоны Западной Сибири / Е. А. Головацкая // Динамика современных экосистем в голоцене : материалы Третьей Всероссийской научной конференции (с международным участием) / отв. ред. И. В. Аськеев, Д. В. Иванов. — Казань : Отечество, 2013. — С. 133.
13. Горная энциклопедия / под ред. Е. А. Козловского. — Москва : Советская энциклопедия, 1984–1991.
14. ГОСТ 27784–88. Почвы. Метод определения зольности торфяных и оторфованных горизонтов почв. — Москва, 1989. — 7 с.
15. ГОСТ 31861–2012. Вода. Общие требования к отбору проб. — Москва : Стандартинформ, 2013. — 31 с.
16. ГОСТ 31957–2012. Вода. Методы определения щелочности и массовой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов. — Москва : Стандартинформ, 2013. — 28 с.
17. ГОСТ Р 54000–2010. Удобрения органические. Сапропели. Общие технические условия. — Москва : Стандартинформ, 2011. — 11 с.
18. ГОСТ Р 54519–2011. Удобрения органические. Методы отбора проб : дата введения 2012-07-01. — Москва : Стандартинформ, 2012.
19. ГОСТ Р 56219–2014 (ИСО 17294–2:2003). Вода. Определение содержания 62 элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. — Москва : Стандартинформ, 2015. — 32 с.
20. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист M-45 — Горно-Алтайск : объяснительная записка / С. И. Федак, Ю. А. Туркин, А. И. Гусев, С. П. Шокальский. — Санкт-Петербург : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2011. — 567 с.
21. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-44 — Новосибирск : объяснительная записка / Г. А. Бабин, А. И. Черных, А. Г. Головина [и др.]. — Санкт-Петербург : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014. — 392 с.
22. Даниленко, И. В. Использование метода ИК спектроскопии при исследовании органоминеральных комплексов донных сапропелевых отложений Западной Сибири / И. В. Даниленко, Е. А. Овдина, П. А. Солотчин // Глины и глинистые минералы : материалы докладов VI Российской школы по глинистым минералам и IV Российского совещания по

глинам и глинистым минералам, Москва, 07–15 ноября 2019 г. — Москва : ИГЕМ РАН, 2019. — С. 110–112.

23. Даувальтер, В. А. Тенденции изменения содержания тяжелых металлов в донных отложениях озер Севера Фенноскандии в последние столетия / В. А. Даувальтер, Н. А. Кашулин, Д. Б. Денисов // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. — 2015. — № 9. — С. 62–75. — DOI 10.17076/lim40.
24. Ермолаева, Н. И. Роль зоопланктона в формировании сапропелей в озерах юга Западной Сибири / Н. И. Ермолаева // Мир науки, культуры и образования. — 2013. — № 6 (43). — С. 545–549.
25. Заварзин, Г. А. Введение в природоведческую микробиологию : учебное пособие / Г. А. Заварзин, Н. Н. Колотилова. — Москва : Книжный дом «Университет», 2001. — 256 с. — ISBN 5-8013-0124-0.
26. Закономерности распределения радионуклидов и редкоземельных элементов в донных отложениях озер различных регионов Сибири / В. Д. Страховенко, Б. Л. Щербов, И. Н. Маликова, Ю. С. Восель // Геология и геофизика. — 2010. — Т. 51, № 11. — С. 1501–1514.
27. Зарубина, Е. Ю. Особенности образования первичной продукции и деструкции органического вещества в горных озерах Русского Алтая / Е. Ю. Зарубина, Г. В. Феттер // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии : материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием. — Барнаул : Пять плюс, 2022. — Т. 2. — С. 236–241.
28. Зарубина, Е. Ю. Первичная продукция макрофитов трех разнотипных сапропелевых озер юга Западной Сибири (в пределах Новосибирской области) в 2012 году / Е. Ю. Зарубина // Мир науки, культуры, образования. — 2013. — № 5 (42). — С. 441–444.
29. Иванов, А. В. Криогенная метаморфизация химического состава природных льдов, замерзающих и талых вод / А. В. Иванов. — Хабаровск : Дальнаука, 1998. — 163 с.
30. Инструкция по разведке озёрных месторождений сапропеля. — Москва : Трест Геолоторфразведка, 1988. — 95 с.
31. Кабата-Пендиас, А. Проблемы современной биогеохимии микроэлементов / А. Кабата-Пендиас // Российский химический журнал. — 2005. — Т. 49, № 3. — С. 15–19.
32. Казаков, В. А. Технологическая характеристика комплексов при разработке озерных сапропелевых месторождений / В. А. Казаков // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № 1. — С. 125–129.
33. Карманова, Н. Г. Универсальная методика рентгенофлуоресцентного силикатного анализа горных пород на спектрометре ARL-9900XP / Н. Г. Карманова, Н. С. Карманов // Тезисы

докладов VII Всероссийской конференции по рентгеноспектральному анализу, Новосибирск, 19–23 сентября 2011 г. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2011.

34. Климатическая история голоцена западного Прибайкалья в карбонатной осадочной летописи озера Холбо-Нур / Е. В. Скляров, Э. П. Солотчина, Е. Г. Вологина [и др.] // Доклады Академии наук. — 2010. — Т. 431, № 5. — С. 668–674.
35. Количественная оценка потоков органического вещества в донные отложения стратифицированного водохранилища долинного типа / Е. Р. Кременецкая, Д. В. Ломова, Д. И. Соколов, В. А. Ломов // Вода: химия и экология. — 2018. — № 7–9. — С. 39–46.
36. Кордэ, Н. В. Биостратиграфия и типология русских сапропелей / Н. В. Кордэ. — Москва : Изд-во АН СССР, 1969. — 219 с.
37. Кривонос, О. И. Разработка нового подхода к комплексной переработке сапропелей : дис. ... канд. хим. наук / О. И. Кривонос ; Институт проблем переработки углеводородов СО РАН. — Омск, 2012. — 157 с.
38. Криогенез современных и позднеплейстоценовых отложений Алтая и перегляциальных областей Европы / В. Н. Конищев, М. П. Лебедева-Верба, В. В. Рогов, Е. Е. Сталина. — Москва : ГЕОС, 2006. — 128 с.
39. Кутепов, Ю. И. Техногенез намывных отложений / Ю. И. Кутепов, Н. А. Кутепова // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2003. — № 5. — С. 405–413.
40. Лапшина, Е. Д. Флора болот юго-востока Западной Сибири / Е. Д. Лапшина. — Томск : Изд-во Том. ун-та, 2004. — 296 с.
41. Лебедева, М. П. Особенности химико-минералогического состава солей в соровых солончаках и озерах Кулундинской степи / М. П. Лебедева, О. В. Лопухина, Н. В. Калинина // Почвоведение. — 2008. — № 4. — С. 467–480.
42. Малов, Г. И. Пространственные закономерности накопления углерода в оз. Песчаное (юг Западной Сибири) в голоцене / Г. И. Малов, В. Д. Страховенко, Е. А. Овдина // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. — 2023. — № 3 (55). — С. 70–77. — DOI 10.20403/2078-0575-2023-3-70-77.
43. Мартынова, М. В. Донные отложения как составляющая лимнических экосистем / М. В. Мартынова. — Москва : Наука, 2010. — 243 с.
44. Минеральный состав и условия формирования донных отложений малых озер плато Укок (Горный Алтай) / В. Д. Страховенко, Г. И. Малов, Е. А. Овдина, В. И. Малов // Геоморфология и палеогеография. — 2023. — Т. 54, № 4. — С. 207–225. — DOI 10.31857/S2949178923040138.

45. Михайлов, В. Н. Гидрология : учебник для вузов / В. Н. Михайлов, А. Д. Добровольский, С. А. Добролюбов. — 3-е изд., стер. — Москва : Высш. шк., 2008. — 463 с.
46. Михайлов, Н. Н. Озера Алтая, их происхождение и история / Н. Н. Михайлов // География и природопользование Сибири. — 1994. — № 1. — С. 75–89.
47. Михальчук, А. А. Статистический анализ эколого-геохимической информации : учебное пособие / А. А. Михальчук, Е. Г. Язиков, В. В. Ершов. — Томск : Изд-во ТПУ, 2006. — 235 с.
48. М-МВИ-80-2008. Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектрометрии. — Санкт-Петербург : Мониторинг, 2008. — 27 с.
49. Моисеенко, Т. И. Биогеохимия кадмия : антропогенное рассеивание, биоаккумуляция и экотоксичность / Т. И. Моисеенко, Н. А. Гашкина // Геохимия. — 2018. — № 8. — С. 759–773. — DOI 10.1134/S001675251808006X.
50. Мукашева, А. С. Генетическая однородность ионно-солевого состава воды Балхаш-Илейского и Арало-Сырдарьинского бассейнов / А. С. Мукашева, Т. Я. Лопарева // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство. — 2013. — № 2. — С. 111–115.
51. Мякишева, Н. В. Многокритериальная классификация озер / Н. В. Мякишева. — Санкт-Петербург : Российский государственный гидрометеорологический университет, 2009. — 160 с.
52. Национальный атлас России : в 4 т. Т. 2 / А. Д. Думнов, А. А. Кирсанов, Е. А. Киселева [и др.]. — Москва : ПКО «Картография», 2007. — 496 с.
53. Никольская, Ю. П. Процессы солеобразования в озерах и водах Кулундинской степи / Ю. П. Никольская. — Новосибирск : Изд-во Сиб. отдел. АН СССР. Химико-металлургический ин-т, 1961. — 200 с.
54. Новейшие данные об оледенении северного склона массива Таван-Богдо-Ола (Алтай) / Д. А. Ганюшкин, К. В. Чистяков, И. В. Волков [и др.] // Лёд и Снег. — 2017. — Т. 57, № 3. — С. 307–325. — DOI 10.15356/2076-6734-2017-3-307-325.
55. Об утверждении Климатической доктрины Российской Федерации [Электронный ресурс] : Указ Президента Российской Федерации от 26 октября 2023 г. № 812 // Официальный интернет-портал правовой информации. — 2023. — Режим доступа: https://publication.pravo.gov.ru/document/0001202310260009 (дата обращения: 18.10.2026).
56. Объяснительная записка к карте четвертичных отложений. Масштаб 1 : 200 000. Серия Кулундинско-Барабинская. Лист N-44-I. — Новосибирск : Западно-Сибирское книжное изд-во, 1967. — 88 с.

57. Овдина, Е. А. Минералого-геохимические особенности и условия формирования органоминеральных донных отложений малых озер юга Западной Сибири : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук / Е. А. Овдина. — Новосибирск : Алекспресс, 2021. — 20 с.
58. ОСТ 41–08–205–99. Управление качеством аналитической работы. Методики количественного химического анализа. Разработка, аттестация, утверждение. — Москва : ВИМС, 1999. — 96 с.
59. Оценка скоростей депонирования углерода донными отложениями малых озер юга Западной Сибири / Г. И. Малов, В. Д. Страховенко, Е. А. Овдина, В. И. Малов // Записки Горного института. — 2026. — Т. 280. — С. 3–15.
60. Паничев, А. М. Новые данные по химическому составу вод Джумалинского геотермального источника, Горный Алтай, Россия / А. М. Паничев, Н. В. Барановская, Е. А. Вах // Полевые исследования в Алтайском биосферном заповеднике. — 2022. — № 4. — С. 137–143.
61. Параметры оценки биологической активности органического вещества сапропелей / Н. В. Юдина, С. И. Писарева, В. И. Панченков, Ю. В. Лоскутова // Химия растительного сырья. — 1998. — № 4. — С. 33–38.
62. Первые данные об изотопном составе серы верхнего современного слоя осадков малых озер юга Западной Сибири / В. Д. Страховенко, Г. И. Малов, Е. А. Овдина, В. И. Малов // Литосфера. — 2026. — Т. 26, № 5. — С. 1042–1060. — DOI 10.24930/2500-302X-2026-26-5-1042-1060.
63. Пестрякова, Л. А. Палеоэкология. Методологические основы палеоэкологии : учебно-методическое пособие / Л. А. Пестрякова. — Якутск : Издательский дом Северо-Восточного федерального университета, 2016. — 84 с.
64. ПНД Ф 14.1:2:4.132–98. Методика выполнения измерений массовой концентрации анионов: нитрита, нитрата, хлорида, фторида, сульфата и фосфата в пробах природной, питьевой и сточной воды методом ионной хроматографии. — Москва, 2008. — 21 с.
65. ПНД Ф 16.1:2:2.2.80–2013 (М 03–09–2013). Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовой доли общей ртути в пробах почв, грунтов, в том числе тепличных, глин и донных отложений атомно-абсорбционным методом с использованием анализатора ртути РА-915М. — Москва, 2013. — 20 с.
66. Подтуркин, Ю. А. Методические рекомендации по составу и правилам оформления представляемых на государственную экспертизу материалов по подсчету запасов металлических и неметаллических полезных ископаемых / Ю. А. Подтуркин, Е. Г. Арешев, Г. Н. Малухин. — Москва : ФГУ «ГКЗ», 2007. — 47 с.

67. Поцелуев, А. А. Калгутинское комплексное месторождение (Горный Алтай) : минералого-геохимическая характеристика, флюидный режим рудообразования / А. А. Поцелуев, Д. И. Бабкин, В. И. Котегов // Геология рудных месторождений. — 2006. — Т. 48, № 5. — С. 439–459.
68. Радиационная оценка сапропелевых отложений малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины (Западная Сибирь) / В. Д. Страховенко, Е. А. Овдина, И. Н. Маликова, Г. И. Малов // Геохимия. — 2022. — Т. 67, № 8. — С. 787–804. — DOI 10.31857/S0016752522080088.
69. Рентгенография основных типов породообразующих минералов / под ред. В. А. Франк-Каменецкого. — Ленинград : Недра, 1983. — 358 с.
70. Росляков, Н. А. Месторождения сапропелевых залежей Новосибирской области / Н. А. Росляков, В. Д. Страховенко, А. И. Сысо // Развитие минерально-сырьевой базы Сибири : от Обручева В. А., Усова М. А., Урванцева Н. Н. до наших дней : материалы Всероссийского форума с международным участием, посвященного 150-летию академика Обручева В. А., 130-летию академика Усова М. А. и 120-летию профессора Урванцева Н. Н., Томск, 24–27 сентября 2013 года / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. — Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2013. — С. 276–279.
71. Руководство по рентгеновскому исследованию минералов / под ред. Д. С. Степанова. — Ленинград : Недра, 1975. — 396 с.
72. Создание консорциума высших водных растений и микроводорослей для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов / Н. Р. Акмуханова, Б. К. Заядан, А. К. Садвакасова [и др.] // Физиология растений. — 2018. — Т. 65, № 1. — С. 73–80. — DOI 10.7868/S0015330318010086.
73. Солотчина, Э. П. Структурный типоморфизм глинистых минералов осадочных разрезов и кор выветривания / Э. П. Солотчина. — Новосибирск : Гео, 2009. — 236 с.
74. Состав, флюидный режим и генезис онгонит-эльвановых магм Калгутинской рудно-магматической системы (Горный Алтай) / Е. Н. Соколова, С. З. Смирнов, Е. И. Астрелина [и др.] // Геология и геофизика. — 2011. — Т. 52, № 11. — С. 1748–1775.
75. Страхов, Н. М. Основы теории литогенеза / Н. М. Страхов. — Москва : Изд-во АН СССР, 1962. — 212 с.
76. Страховенко, В. Д. Геохимическая оценка сапропелевых отложений малых озер Обь-Иртышского междуречья / В. Д. Страховенко, О. П. Таран, Н. И. Ермолаева // Геология и геофизика. — 2014. — Т. 55, № 10. — С. 1466–1477.

77. Страховенко, В. Д. Особенности распределения редкоземельных элементов в водах и донных отложениях малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины / В. Д. Страховенко, Е. А. Овдина // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2021. — Т. 332, № 10. — С. 171–179. — DOI 10.18799/24131830/2021/10/3206.
78. Страховенко, В. Д. Особенности распределения урана в компонентах озерных систем, расположенных в степном ландшафте юга Сибири (Кулундинская и Тажеранская степь) / В. Д. Страховенко, Е. А. Овдина, Г. И. Малов // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. — 2022. — № 2 (50). — С. 88–99. — DOI 10.20403/2078-0575-2022-2-88-99.
79. Субетто, Д. А. Донные отложения разнотипных водоемов. Методы изучения / Д. А. Субетто, М. Я. Прыткова. — Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2016. — 89 с.
80. Укок (прошлое, настоящее, будущее) / А. Н. Рудой, З. В. Лысенкова, В. В. Рудский, М. Ю. Шишин. — Барнаул : Алтайский государственный университет, 2000. — 174 с.
81. Уровни концентрации химических элементов, вариации минерального состава и современная скорость осадконакопления в сапропелевых залежах малых озер зоны тайги юга Сибири / В. Д. Страховенко, Е. А. Овдина, В. И. Малов, Г. И. Малов // Геология и геофизика. — 2023. — Т. 64, № 7. — С. 991–1007. — DOI 10.15372/GiG2023101.
82. Филин, В. А. Исследование и совершенствование методов изучения физико-механических свойств сапропелей : дис. канд. техн. наук / В. А. Филин ; Калининский политехнический институт. — Калинин, 1980. — 240 с.
83. Формирование сапропелей малых озер юга Западной Сибири в условиях антропогенных воздействий / В. Д. Страховенко, Е. А. Овдина, Н. И. Ермолаева, Е. Ю. Зарубина // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии. — 2017. — С. 203–212.
84. Холодов, В. Н. Геохимия осадочного процесса / В. Н. Холодов. — Москва : ГЕОС, 2006. — 608 с. — (Труды ГИН РАН ; вып. 574).
85. Швиденко, А. З. Углеродный бюджет лесов России / А. З. Швиденко, Д. Г. Щепащенко // Сибирский лесной журнал. — 2014. — № 1. — С. 69–92.
86. Шевченко, В. П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике / В. П. Шевченко. — Москва : Наука, 2006. — 226 с.
87. Шилькрот, Г. С. Биогеохимические процессы и потоки веществ и энергии в нарушенных водных экосистемах / Г. С. Шилькрот // Известия Российской академии наук. Серия географическая. — 2008. — № 3. — С. 35–44. — EDN INMKDD.

88. Штин, С. М. Озерные сапропели и основы их комплексного освоения / С. М. Штин ; под ред. И. М. Ялтанца. — Москва: Изд-во Московского государственного горного университета, 2005. — 373 с.

89. Экологическое состояние почв Алтайского края: загрязнение радиоцезием / И. Н. Маликова, В. Д. Страховенко, Ф. В. Сухоруков, А. Ю. Девятова // Сибирский экологический журнал. — 2005. — № 6. — С. 985–998.

90. Янин, Е. П. Техногенные речные илы : вещественный состав и геохимические особенности / Е. П. Янин // Экологические проблемы. Взгляд в будущее. — 2020. — С. 744–748.

91. A high-resolution GIS-based inventory of the west Siberian peat carbon pool / Y. Sheng, L. C. Smith, G. M. MacDonald [et al.] // Global Biogeochemical Cycles. — 2004. — Vol. 18, no. 3. — Art. GB3004. — DOI 10.1029/2003GB002190.

92. A large carbon pool and small sink in boreal Holocene lake sediments / P. Kortelainen, H. Pajunen, M. Rantakari, M. Saarnisto // Global Change Biology. — 2004. — Vol. 10, no. 10. — P. 1648–1653. — DOI 10.1111/j.1365-2486.2004.00848.x.

93. Annex VII : Glossary / edited by J. B. R. Matthews, V. Möller, R. van Diemen [et al.] // Climate Change 2021 : The Physical Science Basis : Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / edited by V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani [et al.]. — Cambridge ; New York : Cambridge University Press, 2023. — P. 2215–2256. — *DOI 10.1017/9781009157896.022*.

94. Appleby, P. G. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported 210Pb to the sediment / P. G. Appleby, F. Oldfield // Catena. — 1978. — Vol. 5, no. 1. — P. 1–8. — DOI 10.1016/S0341-8162(78)80002-2.

95. Carbon pools and accumulation in peatlands of the Former Soviet Union / M. S. Botch, K. I. Kobak, T. S. Vinson, T. P. Kolchugina // Global Biogeochemical Cycles. — 1995. — Vol. 9, no. 1. — P. 37–46. — DOI 10.1029/94GB03156.

96. Carbonates in the sedimentary record of saline Tsagan-Tyrm lake, West Baikal region : new type of high-resolution paleoclimatic signals / E. P. Solotchina, E. V. Sklyarov, E. G. Vologina [et al.] // Doklady Earth Sciences. — 2008. — Vol. 421, no. 2. — P. 926–933. — DOI 10.1134/S1028334X08060147.

97. Carroll, J. Sediment isotope tomography (SIT) model version 1 / J. Carroll, J. D. Abraham. — Grand Junction, CO : Rust Geotech, Inc., 1996. — 19 p. — Report no. DOE/ID/12584–255; GJPO-GJ-26. — DOI 10.2172/272555.

98. Concentration levels and features of the distribution of trace elements in the sapropel deposits of small lakes (South of western Siberia) [Электронный ресурс] / V. Strakhovenko, E. Ovdina, G.

Malov [et al.] // Minerals. — 2021. — Vol. 11, no. 11. — Art. 1210. — Режим доступа: https://www.mdpi.com/2075-163X/11/11/1210 (дата обращения: 18.10.2026). — DOI 10.3390/min11111210.

99. Dating of marine sediments by an incomplete mixing model / J. M. Abril, M. García-León, R. García-Tenorio [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. — 1992. — Vol. 15, no. 2. — P. 135–151. — DOI 10.1016/0265-931X(91)90048-K.
100. Dean, W. E. Magnitude and significance of carbon burial in lakes, reservoirs, and peatlands / W. E. Dean, E. Gorham // Geology. — 1998. — Vol. 26, no. 6. — P. 535–538. — DOI 10.1130/0091-7613(1998)026<0535:MASOCB>2.3.CO;2.
101. Dean, W. E. The carbon cycle and biogeochemical dynamics in lake sediments / W. E. Dean // Journal of Paleolimnology. — 1999. — Vol. 21. — P. 375–393. — DOI 10.1023/A:1008066118210.
102. Downing, J. A. Emerging global role of small lakes and ponds : little things mean a lot / J. A. Downing // Limnetica. — 2010. — Vol. 29, no. 1. — P. 9–24. — DOI 10.23818/limn.29.02.
103. Dugan, G. Analyzer for the dynamic microdetermination of carbon, hydrogen, nitrogen, sulfur, and oxygen / G. Dugan, V. A. Aluise // Analytical Chemistry. — 1969. — Vol. 41, no. 3. — P. 495–501. — DOI 10.1021/ac60272a029.
104. Gas’kova, O. L. Composition of brines and mineral zoning of the bottom sediments of soda lakes in the Kulunda steppe (West Siberia) / O. L. Gas’kova, V. D. Strakhovenko, E. A. Ovdina // Russian Geology and Geophysics. — 2017. — Vol. 58, no. 10. — P. 1199–1210. — DOI 10.1016/j.rgg.2016.09.034.
105. Goldberg, E. D. Geochronology with lead-210 / E. D. Goldberg // Radioactive Dating. — Vienna : International Atomic Energy Agency, 1963. — P. 121–131.
106. Håkanson, L. Principles of lake sedimentology / L. Håkanson, M. Jansson. — Berlin : Springer-Verlag, 1983. — 316 p. — DOI 10.1007/978-3-642-69274-1.
107. Hinderer, M. The world's large lake basins as denudation-accumulation systems and implications for their lifetimes / M. Hinderer, G. Einsele // Journal of Paleolimnology. — 2001. — Vol. 26, no. 4. — P. 355–372. — DOI 10.1023/A:1012651232541.
108. Increasing rates of atmospheric mercury deposition in midcontinental North America / E. B. Swain, D. R. Engstrom, M. E. Brigham [et al.] // Science. — 1992. — Vol. 257, no. 5071. — P. 784–787. — DOI 10.1126/science.257.5071.784.
109. Kabata-Pendias, A. Trace metals in soils—a current issue in Poland / A. Kabata-Pendias // Acta Universitatis Wratislaviensis. Prace Botaniczne. — 2001. — Vol. 79. — P. 13–20.

110. Kastowski, M. Long-term carbon burial in European lakes : Analysis and estimate / M. Kastowski, M. Hinderer, A. Vecsei // Global Biogeochemical Cycles. — 2011. — Vol. 25, no. 3. — Art. GB3019. — DOI 10.1029/2010GB003874.
111. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate / L. J. Tranvik, J. A. Downing, J. B. Cotner [et al.] // Limnology and Oceanography. — 2009. — Vol. 54, no. 6, part 2. — P. 2298–2314. — DOI 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2298.
112. Malov, G. I. Quantitative assessment of carbon sequestration by sapropel deposits inferred from Lakes Peschanoe and Nizhnee (Western Siberia, Russia) / G. I. Malov, E. A. Ovdina, V. D. Strakhovenko // Limnology and Freshwater Biology. — 2022. — No. 4. — P. 1482–1484. — EDN IQSKUJ. — DOI 10.31951/2658-3518-2022-A-4-1482.
113. Meyers, P. A. Lacustrine organic geochemistry—an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments / P. A. Meyers, R. Ishiwatari // Organic Geochemistry. — 1993. — Vol. 20. — P. 867–900. — DOI 10.1016/0146-6380(93)90100-P.
114. Mulholland, P. J. The role of lake and reservoir sediments as sinks in the perturbed global carbon cycle / P. J. Mulholland, J. W. Elwood // Tellus. — 1982. — Vol. 34, no. 5. — P. 490–499. — DOI 10.1111/j.2153-3490.1982.tb01837.x.
115. Nriagu, J. O. A global assessment of natural sources of atmospheric trace metals / J. O. Nriagu // Nature. — 1989. — Vol. 338, no. 6210. — P. 47–49. — DOI 10.1038/338047a0.
116. Organic carbon burial in global lakes and reservoirs [Электронный ресурс] / R. Mendonça, R. A. Müller, D. W. Clow [et al.] // Nature Communications. — 2017. — Vol. 8, no. 1. — Art. 1694. — Режим доступа: https://www.nature.com/articles/s41467-017-01789-6 (дата обращения: 18.10.2026). — DOI 10.1038/s41467-017-01789-6.
117. Soininen, L. AMAP Human Health : Biomonitoring and Studying the Nutrition of Mothers and Newborn in the Finnish Lapland / L. Soininen, H. Mussalo-Rauhamaa, S. Hyvönen. — Rovaniemi : Lapland Regional Environment Centre, 2005. — 108 p. — (Regional Environmental Publications ; 389). — ISBN 952-11-2000-2.
118. Spatio-temporal distribution of gross mercury contents in the bottom sediments of small lakes of the taiga zone / V. D. Strakhovenko, V. I. Malov, G. I. Malov, E. A. Ovdina // Limnology and Freshwater Biology. — 2022. — No. 3. — P. 1262–1265. — DOI 10.31951/2658-3518-2022-A-3-1262.
119. Strakhovenko, V. The carbon isotopes ratio in small lakes bottom sediments located in the forest-steppe and steppe zones of southern Siberia [Электронный ресурс] / V. Strakhovenko, E. Ovdina, G. Malov // E3S Web of Conferences. — 2019. — Vol. 98. — Art. 12021. — Режим доступа: https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199812021 (дата обращения: 18.10.2026). — DOI 10.1051/e3sconf/20199812021.

120. The role of sediments in the carbon budget of a small boreal lake / H. E. Chmiel, J. Kokic, B. A. Denfeld [et al.] // Limnology and Oceanography. — 2016. — Vol. 61, no. 5. — P. 1814–1825. — DOI 10.1002/lno.10336.
121. Travertines of the South-Eastern Gorny Altai (Russia) : Implications for Paleoseismology and Paleoenvironmental Conditions [Электронный ресурс] / E. V. Deev, S. N. Kokh, Y. Dublyansky [et al.] // Minerals. — 2023. — Vol. 13, no. 2. — Art. 259. — Режим доступа: https://www.mdpi.com/2075-163X/13/2/259 (дата обращения: 18.10.2026). — DOI 10.3390/min13020259.
122. Wedepohl, K. H. The composition of the continental crust / K. H. Wedepohl // Geochimica et Cosmochimica Acta. — 1995. — Vol. 59, no. 7. — P. 1217–1232. — DOI 10.1016/0016-7037(95)00038-2.

Список сокращений и условных обозначений

Сокращения

АЭС — атомная электростанция

БВ — битумные вещества (битумы), экстрагируемые спирт-бензольной смесью

$БПК_5$ — биохимическое потребление кислорода за пять суток

ВАК — Высшая аттестационная комиссия

ВВ — взвешенное вещество (при исследовании воды); водорастворимые вещества (при фракционировании сапропеля)

ГВ — гуминовые вещества

ГИС — геоинформационная система

ГК — гуминовые кислоты

ГОСТ — государственный стандарт

ГОСТ Р — национальный стандарт Российской Федерации

ГСО — государственный стандартный образец

ДО — донные отложения

ИВЭП СО РАН — Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук

ИГМ СО РАН — Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук

ИК — инфракрасный (в сочетании «ИК-спектры»)

ИК СО РАН — Институт катализа им. Г. К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук

ИПА СО РАН — Институт почвоведения и агрохимии Сибирского отделения Российской академии наук

ИСО — Международная организация по стандартизации

КАНИФЕР — камера низкого фона естественной радиоактивности

КПШ — калиевые полевые шпаты

ЛГВ — легкогидролизуемые вещества

ЛЭП — линия электропередачи

МАГАТЭ — Международное агентство по атомной энергии

НГО — негидролизуемый остаток

НГПУ — Новосибирский государственный педагогический университет

НПО — научно-производственное объединение

НЦИК — Национальный центр исследования катализаторов

ОВ — органическое вещество

ОСТ — отраслевой стандарт

ПНД Ф — природоохранные нормативные документы федерального уровня

ППП — потери при прокаливании

СЭМ — сканирующая электронная микроскопия; сканирующий электронный микроскоп

ТГВ — трудногидролизуемые вещества

УЭП — удельная электропроводность

ФК — фульвовые кислоты

ЦКП — центр коллективного пользования

BSE — обратнорассеянные электроны (Backscattered Electrons); режим получения изображений в СЭМ

CHNS/O, CHNOS — обозначения элементного анализа органического вещества по углероду, водороду, азоту, сере и кислороду

CHSN — обозначение элементного состава по углероду, водороду, сере и азоту

CIC — модель постоянной начальной концентрации ^{210}Pb (Constant Initial Concentration)

CRS — модель постоянного потока ^{210}Pb (Constant Rate of Supply)

GPS — глобальная система позиционирования (Global Positioning System)

HPGe — сверхчистый германий (High-Purity Germanium); материал полупроводникового детектора

IMZ — модель зоны неполного перемешивания (Incomplete Mixing Zone)

R-анализ — кластерный анализ связей между переменными (химическими элементами)

SIT — изотопная томография осадков (Sediment Isotope Tomography)

TDS — суммарное содержание растворённых веществ; общая минерализация воды (Total Dissolved Solids)

XRD — рентгеновская дифрактометрия (X-Ray Diffraction)

Условные обозначения

$C_{орг}$ — органический углерод; в расчётах запасов — масса захоронённого органического углерода

$C_{мин}$ — минеральный (карбонатный) углерод; в расчётах запасов — масса углерода, захоронённого в карбонатах

pH— водородный показатель

Eh — окислительно-восстановительный потенциал, мВ

^{137}Cs (Cs137) — цезий-137, радионуклид, используемый как маркер радиоактивных выпадений

^{210}Pb (Pb210) — свинец-210, радионуклид, используемый для датирования донных отложений

Cd, Hg, Pb — кадмий, ртуть и свинец соответственно — исследуемые элементы — потенциальные поллютанты

t — возраст осадка по модели CRS, лет

λ — постоянная радиоактивного распада ^{210}Pb, год$^{-1}$

A_q — полный запас ^{210}Pb в колонке осадка в расчёте по модели CRS

A_y — запас ^{210}Pb ниже датируемого уровня в расчёте по модели CRS

$P_{60\%}$ — запасы (выход) сапропеля при условной влажности 60 %

$P_{сух}$ — запасы сухого сапропеля

V — объём сапропеля, м³ или тыс. м³; в расчёте годового накопления — объём на 1 га в год

v — скорость осадконакопления

S — площадь; в расчёте годового накопления принимается равной 1 га

X — объёмная масса сапропеля

$W_{еств}$ — естественная влажность сапропеля, %

$W_{усл}$ — условная влажность сапропеля, принимаемая равной 60 %

N, I — содержание органического вещества в пробе, %

L — содержание углерода в органической части, % (в формуле (2)); в описании пробоотборника — его длина

d — диаметр пробоотборника

Z — зольность сапропеля, %

K_{Ca} — содержание кальция, связанного с карбонатами, в сухой пробе

$K_{Ca, Mg}$ — содержание кальция и магния, связанных с карбонатами, в сухой пробе

M — масса элемента в сапропелевой залежи, т

K — концентрация элемента в сухой пробе сапропеля, г/т

$\rho_{ск. зал}$ — плотность скелета сапропелевой залежи — содержание сухого вещества в единице объёма залежи, т/м³

$\rho_т$ — плотность твёрдой фазы сапропеля, т/м³

ω — относительная влажность сапропеля, %

ρ — коэффициент ранговой корреляции Спирмена (в статистическом анализе)

P — доверительная вероятность (при оценке погрешности измерений)

δ — стандартное отклонение

σ — относительное среднеквадратическое отклонение повторяемости, %

σ_R — относительное среднеквадратическое отклонение воспроизводимости, %

$A_д$ — дерновый горизонт почвы

A — гумусовый горизонт почвы

AB — переходный почвенный горизонт

C — почвообразующая порода (в обозначении почвенного горизонта)

Единицы измерения

ppm — миллионная доля; для массовых содержаний в твёрдых пробах 1 ppm = 1 мг/кг = 1 г/т

Бк — беккерель — единица активности радионуклидов; 1 Бк = 1 $с^{-1}$

Пг — петаграмм; 1 Пг = 10^{15} г

тС/(га·год) — тонны углерода на гектар в год — единица скорости депонирования углерода

Приложения

Приложение 1

Озеро	X	Y	Тип седиментогенеза	Ландшафт	класс	Зольность
Петухово у д.Северка	52,10368	79,15327	Аридный	Бор	Смешанный	79,44
Танатар 6-й	51,62134	79,81650	Аридный	Бор	Si	80,30
Танатар 4-й	51,63437	79,85386	Аридный	Бор	Смешанный	65,26
Малиновое	51,68991	79,73917	Аридный	Бор	Ca	83,93
Йодное	51,69185	79,80693	Аридный	Бор	Смешанный	79,00
Рублево	51,63332	79,99302	Аридный	Бор	Ca	68,38
Демкино	51,62741	79,88466	Аридный	Бор	Ca	64,86
Каратан	51,71667	79,88413	Аридный	Бор	Si	94,00
Золотое	51,51160	80,16635	Аридный	Бор	Смешанный	69,00
Коростелевское	51,24052	80,31432	Аридный	Бор	Смешанный	91,00
Гор-Перешеечн	51,82726	80,89485	Аридный	Бор	Смешанный	90,00
Рыбальное	51,55141	80,41987	Аридный	Бор	Смешанный	68,00
Бол. Тархатинское	49,57099	88,38467	Нивальный	Горы	Si	56,00
Мал. Тархатинское	49,57573	88,38820	Нивальный	Горы	Si	57,00
Аргамджи	49,31912	87,92268	Нивальный	Горы	Si	53,50
Тёплый ключ	49,40753	88,03695	Нивальный	Горы	Si	89,75
Красное	49,51627	88,02933	Нивальный	Горы	Si	83,25
Зерлюколь-нур	49,55765	88,20972	Нивальный	Горы	Si	72,56
Безымянное	50,45313	87,67050	Нивальный	Горы	Si	66,17
Подкова	50,45547	87,61307	Нивальный	Горы	Si	41,57
Малый Узенкуль	50,47086	87,60949	Нивальный	Горы	Si	45,60
Игисту-Коль	50,51390	87,67593	Нивальный	Горы	Si	87,00
Бирюзовое	50,40923	87,59924	Нивальный	Горы	Смешанный	81,18
Канкуль	55,22884	80,53148	Гумидный	Лесостепь	Смешанный	85,00
Качкульня	55,24736	80,58445	Гумидный	Лесостепь	Смешанный	17,00

Озеро	X	Y	Тип седиментогенеза	Ландшафт	класс	Зольность
Иткуль	55,06086	81,02536	Гумидный	Лесостепь	Si	83,00
Бергуль	55,60488	78,26114	Гумидный	Лесостепь	Смешанный	65,00
Барчин	55,71126	78,14488	Гумидный	Лесостепь	Са	51,71
Камбала	55,67543	78,20223	Гумидный	Лесостепь	Si	58,00
Ярголь	55,60186	78,36239	Гумидный	Лесостепь	Смешанный	35,25
М.Минзелинское	55,57215	83,26152	Гумидный	Лесостепь	Смешанный	44,85
Чулым	55,70751	78,09812	Гумидный	Лесостепь	Si	55,00
Казатово	55,64296	78,11960	Гумидный	Лесостепь	Si	70,00
Кайлы	55,62340	78,27348	Гумидный	Лесостепь	Смешанный	55,00
Б. Кайлы	55,41619	78,30154	Гумидный	Лесостепь	Si	66,00
Бугристое	55,37367	78,39178	Гумидный	Лесостепь	Si	49,00
Сарбалык	55,55642	78,71511	Гумидный	Лесостепь	Si	47,61
Суеток	55,53868	78,56039	Гумидный	Лесостепь	Si	59,55
Бол. Курган	55,57335	78,68706	Гумидный	Лесостепь	Si	44,09
Бильгень	55,55698	78,62695	Гумидный	Лесостепь	Si	71,70
Жилое	54,83240	78,74040	Гумидный	Лесостепь	Si	62,30
Бол.Чича	54,74108	78,56858	Гумидный	Лесостепь	Si	88,93
Мостовое	55,45832	78,20477	Гумидный	Лесостепь	Si	54,33
Жилое-К	55,51762	78,02405	Гумидный	Лесостепь	Si	69,27
Цыбово	55,51357	77,97641	Гумидный	Лесостепь	Si	47,20
Бол. Кайлы.	55,41619	78,30154	Гумидный	Лесостепь	Si	67,40
Песчаное	55,41133	78,34677	Гумидный	Лесостепь	Смешанный	50,37
Чистое	55,40195	78,36744	Гумидный	Лесостепь	Si	68,30
Шубинское	55,32093	78,18781	Гумидный	Лесостепь	Si	53,43
Верхнее	55,39130	78,49855	Гумидный	Лесостепь	Si	60,80
Нижнее	55,38482	78,51139	Гумидный	Лесостепь	Si	39,53
Голдобинское	55,32189	78,11677	Гумидный	Лесостепь	Si	72,40

Озеро	X	Y	Тип седиментогенеза	Ландшафт	класс	Зольность
Куклей	54,23978	79,36468	Аридный	Степь	Si	64,00
Кротова Ляга	53,72211	77,86932	Аридный	Степь	Si	92,00
Кусган	53,74454	77,87859	Аридный	Степь	Si	91,00
Хорошее	53,57785	78,57953	Аридный	Степь	Si	91,00
Красно-Вишневое	53,82992	76,97287	Аридный	Степь	Si	94,96
Петухово у д.Петухово	52,26893	79,47420	Аридный	Степь	Si	88,50
Желтырь	52,17230	79,34685	Аридный	Степь	Si	93,67
Куречье	52,20686	79,47900	Аридный	Степь	Ca	87,98
Баево	53,25763	80,74509	Аридный	Степь	Смешанный	70,00
Горькое	52,99472	80,72176	Аридный	Степь	Смешанный	77,00
Спирино	52,25125	82,08050	Аридный	Степь	Смешанный	68,00
Белое	51,29381	82,65257	Аридный	Степь	Смешанный	72
Яково	56,75718	84,77000	Гумидный	Тайга	Si	50,60
Мальцево	56,75000	84,74167	Гумидный	Тайга	Si	29,20
Круглое	56,75000	84,70570	Гумидный	Тайга	Si	59,50
Данилово	56,42625	75,84452	Гумидный	Тайга	Ca	77,08
Ленево	56,40485	75,62215	Гумидный	Тайга	Ca	80,67
Урманное	56,47848	76,11817	Гумидный	Тайга	Ca	81,67
Карбалык	56,57000	76,50857	Гумидный	Тайга	Ca	75,33
Щучье-К	56,53948	76,45990	Гумидный	Тайга	Si	40,00
Щучье-П	56,37755	76,39873	Гумидный	Тайга	Ca	81,40
Щучье-Л	56,40868	76,65330	Гумидный	Тайга	Ca	66,63
Яково	56,75718	84,77000	Гумидный	Тайга	Si	15,50
Щучье Базовое	57,39553	84,83733	Гумидный	Тайга	Si	54,20
Лайское-1	57,51208	84,74443	Гумидный	Тайга	Si	40,00
Лайское-3	57,57107	84,80090	Гумидный	Тайга	Si	37,17
Малое Щучье	57,45245	84,39767	Гумидный	Тайга	Si	37,17

Озеро	X	Y	Тип седиментогенеза	Ландшафт	класс	Зольность
Щучье около Оби д. Кипрюшка	57,22235	84,45732	Гумидный	Тайга	Si	18,73

Приложение 2

Озеро	Зольность, %	C, %	Скорость осадконакопления, см/год	*W*, %
Базовое Щучье	15,50	27,00	0,21	83
Лайское-1	40,00	30,00	0,64	83
Яково	50,60	45,00	0,42	79
Качкульня	17,00	43,30	0,31	71
Нижнее	39,53	33,40	0,30	70
Бильгень	71,70	33,98	0,30	69
Сарбалык	47,61	30,60	0,30	76
Подкова	41,57	27,50	0,30	81
Бугристое	49,00	26,53	0,30	76
Куклей	64,00	28,10	0,30	71
Суеток	59,55	18,89	0,40	73
Круглое	59,50	20,25	0,41	70
Аргамджи	53,50	24,61	0,40	70
Ярголь	35,25	35,00	0,35	71
Малое Тархатинское	57,00	21,50	0,27	74
Большой Курган	44,09	15,97	0,30	80
Камбала	58,00	26,70	0,16	74
Казатово	70,00	26,64	0,30	62
Зерлюколь-Нур	72,56	9,20	0,30	81
Большие Кайлы	67,40	20,00	0,30	63
Красное	83,25	6,10	0,30	67
Малое Минзелинское	44,85	45,44	0,30	89
Кайлы	55,00	32,65	0,30	79
Песчаное	50,37	19,00	0,18	79
Игисту-Коль	87,00	6,50	0,22	71
Бергуль	65,00	18,00	0,23	71
Барчин	51,71	22,80	0,30	71
Кусган	91,00	4,70	0,30	71
Петухово (у деревни Северка)	79,44	15,31	0,30	59
Танатар 6-й	80,30	9,85	0,34	43
Кротова Ляга	92,00	2,30	0,30	71
Бирюзовое	81,18	15,90	0,26	77
Танатар 4-й	65,26	12,10	0,21	55
Золотое	69,00	15,50	0,28	73
Демкино	64,86	15,30	0,20	73
Рублево	68,38	15,31	0,16	69
Щучье-Л	66,63	22,50	0,30	84
Канкуль	85,00	7,30	0,30	71
Иткуль	83,00	7,30	0,30	71

Приложение 3

озеро	Cd Верх	Hg Верх	Pb Верх	Cd Низ	Hg Низ	Pb Низ
	г/м3					
Канкуль	0,05	0,01	2,21	0,03	0,06	3,40
Качкульня	0,03	0,01	1,26	0,04	0,01	0,48
Иткуль	0,04	0,00	2,88	0,04	0,01	4,72
Бергуль	0,04	0,01	2,60	0,04	0,01	2,06
Барчин	0,03	0,01	1,13	0,03	0,01	0,44
Камбала	0,06	0,01	2,28	0,08	0,01	2,52
Ярголь	0,04	0,00	1,23	0,07	0,00	1,49
Куклей	0,05	0,01	2,10	0,05	0,01	5,07
Кротова Ляга	0,04	0,00	2,25	0,05	0,01	5,09
Кусган	0,06	0,00	2,89	0,09	0,00	5,89
М.Минзелинское	0,06	0,01	8,89	0,07	0,01	14,70
Казатово	0,01	0,00	1,74	0,01	0,00	3,59
Кайлы	0,01	0,00	2,18	0,04	0,00	1,65
Б. Кайлы	0,05	0,00	1,48	0,05	0,00	2,59
Бугристое	0,10	0,00	5,95	0,05	0,00	2,14
Сарбалык	0,05	0,00	2,17	0,08	0,00	2,76
Суеток	0,08	0,00	2,98	0,21	0,00	6,71
Бол. Курган	0,03	0,00	1,28	0,08	0,00	1,98
Бильгень	0,08	0,00	3,00	0,13	0,00	6,14
Бол. Кайлы.	0,03	0,02	1,26	0,08	0,01	2,97
Песчаное	0,01	0,01	1,07	0,02	0,01	1,63
Петухово у д.Северка	0,01	0,01	0,90	0,02	0,01	6,07
Танатар 6-й	0,05	0,02	6,15	0,05	0,01	6,58
Танатар 4-й	0,03	0,01	4,15	0,03	0,02	2,74
Рублево	0,01	0,00	0,84	0,01	0,01	2,32
Демкино	0,00	0,00	0,82	0,00	0,00	1,40
Круглое	0,08	0,02	2,88	0,03	0,03	4,44
Петухово (сев)	0,01	0,01	1,54	0,01	0,01	2,49
Щучье-Л	0,01	0,00	0,56	0,00	0,00	0,21
Нижнее	0,04	0,01	1,79	0,09	0,01	2,42
Мал. Тархатинское	0,03	0,02	2,12	0,10	0,03	7,19
Аргамджи	0,04	0,02	2,03	0,05	0,03	4,43
Красное	0,06	0,02	3,20	0,11	0,03	5,19
Зерлюколь-нур	0,05	0,02	1,82	0,02	0,02	1,10
Подкова	0,03	0,01	15,72	0,01	0,01	0,68
Игисту-Коль	0,01	0,01	2,39	0,01	0,01	2,35
Бирюзовое	0,01	0,03	2,11	0,03	0,05	4,53
Яково	0,11	0,08	1,14	0,04	0,09	2,48
Щучье Базовое	0,04	0,01	1,29	0,04	0,01	2,09
Лайское-1	0,02	0,00	1,42	0,04	0,01	1,44
Золотое	0,02	0,00	2,36	0,01	0,01	1,76