ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru

Научная статья

Геотехнология и инженерная геология

Оценка скоростей депонирования углерода донными отложениями малых озер юга Западной Сибири

Г.И.Малов, В.Д.Страховенко, Е.А.Овдина, В.И.Малов✉

Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

***Как цитировать эту статью*:** 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. Т. 280. С. 3-15. EDN FFIAEM

Аннотация

Исследование посвящено количественной оценке скоростей депонирования органического углерода ($C_{орг}$) в донных отложениях малых озер, расположенных на юге Западной Сибири. Изученные водоемы охватывают широкий спектр ландшафтно-климатических условий и типов седиментационных обстановок. Несмотря на локальные размеры, малые озера региона демонстрируют исключительно высокую эффективность долговременного захоронения углерода. Показано, что их способность аккумулировать $C_{орг}$ сопоставима или даже превышает аналогичные показатели таких признанных углеродных депо, как болота и морские шельфы. В основе работы лежит комплексный анализ донных отложений, включающий радиометрическое датирование (Pb-210, Cs-137) для определения скоростей осадконакопления и возраста слоев, а также морфологический, элементный (CHNS-анализ) и рентгенофазовый анализы. По полученным данным выявлено, что средняя скорость депонирования $C_{орг}$ в исследованных озерах достигает 462±29 г/м^2 в год. Установлено, что основная часть углерода (> 50 % в большинстве случаев) аккумулируется именно в форме органического вещества даже в озерах с интенсивным внутриводоемным (аутигенным) карбонатообразованием. Исследование выявило основные факторы, контролирующие углеродонакопление: продуктивность водных сообществ (фито- и зоопланктон, макрофиты), общая скорость седиментации, зольность осадков (доля минеральной составляющей) и локальные морфометрические особенности озер (глубина, форма котловины). Отсутствие четкой зависимости скоростей депонирования углерода от ландшафтной зональности подчеркивает критическую важность учета локальных условий при моделировании вклада малых озер в глобальный углеродный цикл. Полученные результаты существенно восполняют пробелы региональной углеродной оценки и доказывают значимость малых озер юга Западной Сибири как высокоэффективных и устойчивых природных депо органического углерода в условиях континентального осадконакопления.

Ключевые слова

сапропель; донные отложения; малые озера; депонирование углерода; карбонатный углерод; карбонаты

Финансирование

Работа выполнена по Государственному заданию ИГМ СО РАН FWZN-2026-0008.

Поступила: 16.06.2025 ***Принята: 04.03.2026*** ***Онлайн: 11.06.2026*** ***Опубликована: 10.09.2026***

Введение

Изменения в глобальном углеродном цикле являются фундаментальным фактором современных климатических сдвигов, что обуславливает необходимость пересмотра вклада различных природных систем в секвестрацию углерода [1, 2].

Континентальные водоемы характеризуются интенсивным обменом углерода с атмосферой и значительным депонированием органического вещества в донные отложения (ДО), что делает их важными компонентами наземного углеродного резерва. Континентальные водоемы, особенно малые озера и пруды, демонстрируют высокую эффективность аккумуляции органического углерода на единицу площади в сравнении с крупными озерами и морскими акваториями [3, 4]. Малые искусственные и восстановленные пруды имеют особенно высокие темпы накопления углерода, достигающие 152 г/м$^{-2}$ в год$^{-1}$ [5]. Более крупные водоемы характеризуются меньшими темпами

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

накопления из-за особенностей морфометрии [6]. Внутренние воды в целом превышают океаны по эффективности захоронения органического углерода на единицу площади [3]. Несмотря на это, их вклад в глобальные оценки углеродного захоронения остается недостаточно изученным и, как следствие, слабо представлен в климатических моделях и сценариях будущих изменений.

В глобальном углеродном балансе принято говорить о «поглощенном сушей углероде» (SLAND) – объеме CO_2, который наземные экосистемы удерживают в ответ на рост концентрации CO_2 и изменения климата. Для оценки этого поглощения используются динамические глобальные модели растительности (DGVM). Формально в понятие SLAND входят не только леса и почвы, но также и все континентальные водоемы – реки, озера, водохранилища, эстуарии [1]. На практике же модели описывают наземные процессы гораздо детальнее, чем водные. Существующие модели почти не учитывают, сколько углерода смывается с суши в реки и озера и как этот поток менялся со временем. В результате роль озер и других внутренних вод в мировом углеродном цикле хотя и признается важной, но количественно недооценена. Модели фиксируют наземное поглощение CO_2, не прослеживая дальнейший путь углерода, который выводится из экосистем суши в водные системы [1].

Существующие исследования подтверждают, что континентальные водоемы могут выступать как источниками, так и хранилищами углерода, но оценки варьируются в широких пределах, особенно для озер малых размеров. Согласно H.E.Chmiel [7], повышенная чувствительность малых озер к изменениям температуры, гидрологического режима и поступления терригенного органического вещества обуславливает высокую изменчивость их углеродного баланса, что сильнее затрудняет оценку и дает спектр неопределенности в глобальных подсчетах баланса углерода.

Юг Западной Сибири – уникальный природный полигон, включающий границу между лесной и степной зонами, что обеспечивает широкий спектр гидрологических и седиментационных условий. В пределах региона сочетаются гумидные, аридные и нивальные типы седиментогенеза, а сами озера варьируются по морфометрии, степени антропогенной нагрузки и источникам органического вещества. Однако в научной литературе практически отсутствуют количественные оценки скоростей депонирования углерода в озерных отложениях этой территории.

Несмотря на высокую лесистость, болотность и озерность, Западная Сибирь остается «белым пятном» в глобальных углеродных оценках. Торфяники здесь занимают ≈ 22 % площади низменности и аккумулируют ~$7 \cdot 10^{13}$ кг углерода [8]. В работе Е.А.Головацкой [9] анализ баланса углерода в болотах региона подтверждает огромные запасы и потенциальную роль этих экосистем как устойчивых углеродных депо. Спутниковые данные Landsat-8 выявляют > 720000 озер площадью > 0,5 га (около 6 % территории), однако для большинства мелких водоемов нет прямых измерений газообмена и запасов углерода [10]; глобальная база BAWLD отмечает критический дефицит замеров CH_4 для Обь-Иртышской поймы и озер региона [11].

Цель работы – оценить скорости и пространственную вариабельность депонирования органического углерода в ДО малых озер юга Западной Сибири в условиях разных ландшафтных зон.

Результаты позволят уточнить оценку роли внутренних водоемов в региональном и глобальном балансе углерода, а также могут быть использованы для улучшения параметризации озерных систем в климатических моделях [12] и при разработке стратегий адаптации к изменению климата в высокоширотных регионах. Более того, учет специфики углеродонакопления в сибирских озерах критически важен для повышения точности прогноза углеродного баланса Северного полушария.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования являются ДО малых озер юга Западной Сибири, которые в изученных водоемах представлены сапропелями, – органоминеральные ДО водоемов, формирующиеся в результате биохимических, микробиологических, механических процессов из остатков отмирающих растительных и животных организмов, аутигенных минералов и привносимых в водоемы органических и минеральных частиц.

Исследуемые озера локализованы на юге Западной Сибири (рис.1), в основном в юго-восточной части Западно-Сибирской платформы, граничащей с Алтае-Саянской складчатой областью, в пределах Обь-Иртышского междуречья и на территории Горного Алтая (плато Укок, Улаганская долина).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Г.И.Малов, В.Д.Страховенко, Е.А.Овдина, В.И.Малов, 2026

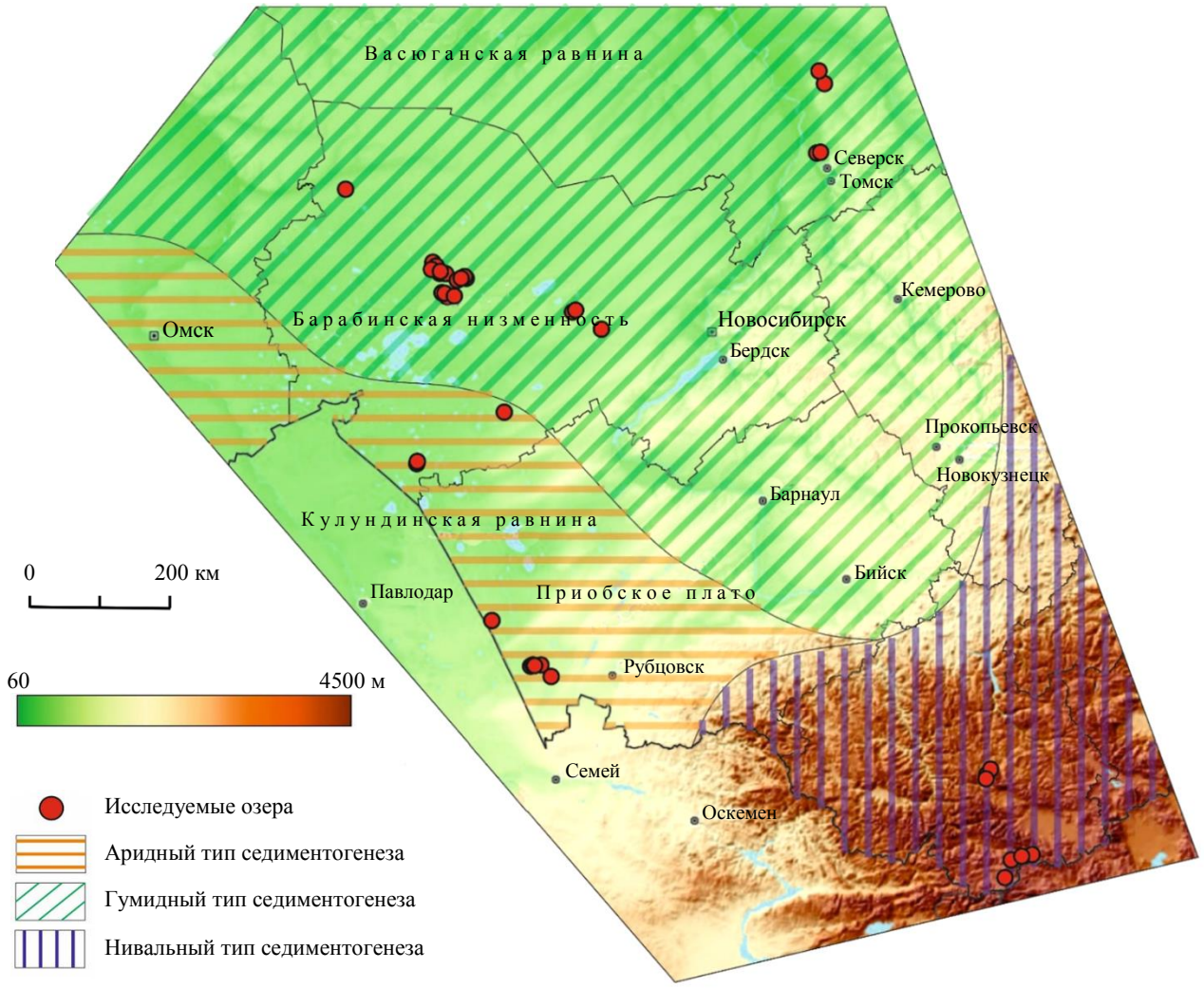


Рис.1. Схема расположения исследуемых озер

На равнинной части исследуемой территории проявляется природно-климатическая зональность. С севера на юг здесь представлены бореальная Васюганская таежно-болотная плоская равнина, суббореальные Барабинская равнинная лесостепь, сменяющаяся Кулундинской степной низменной равниной. На крайнем юго-западе Кулундинской степи выделяется сухостепная зона [13]. Юго-восточнее с увеличением высот на территории Горного Алтая широтная зональность сменяется высотной.

Параллельно с изменением ландшафтно-климатических зон происходит смена типов седиментации в исследуемых озерах (по Н.М.Страхову [14]):

• Васюганская равнина – гумидный тип седиментогенеза;

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

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

Поскольку работа преследует цель региональной оценки, подбор объектов исследования происходил по общим морфометрическим, гидрологическим, гидрохимическим, трофическим и другим показателям, соответствующим средним характеристикам преобладающих озер для исследованных территорий. Всего изучено 41 озеро: 10 расположены в условиях аридного типа седиментогенеза, 7 – нивального типа и 24 – в условиях гумидного типа седиментогенеза. Все исследованные озера относятся к малым ($0{,}1 < S < 10$ км^2) с глубиной до 10 м (средняя глубина 3 м) постоянным бессточным водоемам (в степных районах с аридным климатом часть исследуемых озер теряет значительную

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

часть воды в меженный период). По степени эвтрофикации исследуемые озера делятся от мезотрофно-эвтофных, находящихся в условиях гумидного типа седиментогенеза, до олиготрофных, находящихся в условиях нивального типа. Среди изученных озер преобладают суффузионно-просадочные котловины на равнинных частях исследуемых районов (степной, лесостепной и таежный ландшафты), которые часто являются наследниками лощинно-гривного рельефа на территории Барабинской низменности и Кулундинской равнины. В горном ландшафте преобладают озерные котловины термокарстового и моренно-подпрудного типов с наложенными неотектоническими процессами.

Отобранный фактический материал является результатом комплексных многолетних исследований [15-17]. Экспедиционные работы проводились в летнее время, после схода снега, в меженный период. На объектах исследования использовался метод комплексности: каждое озеро рассматривалось как отдельная озерная система, с отбором проб ДО, воды, почвы, коренных горных пород при их наличии, преобладающей растительности и песков с волноприбойной зоны озера. Рельеф дна озерной котловины и строение ДО озер проводилось эхолотом ECHOMAP Plus 62cv с последующим опробованием в наиболее репрезентативных местах (наибольший разрез ДО, удаленность от антропогенных объектов). Отбор проб ДО производился цилиндрическим пробоотборником с вакуумным затвором конструкции НПО «Тайфун» (диаметр d = 82 мм и длина L = 120 см). Опробование керна производилось на месте с шагом 3-5 см.

Аналитические исследования проводились в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, Новосибирск. Основные характеристики ДО (влажность, зольность, pH) определялись по ГОСТ 26713, ГОСТ 27980, ГОСТ 27979. Макро- и микроэлементный состав проб определялся атомно-абсорбционным методом на спектрометре Solaar M6 (Thermo Electron, США) и методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре высокого разрешения ELEMENT (Finnigan MAT). Изучение морфологии, минерального, фазового и химического составов ДО проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) MIRA 3 Tescan и методом рентгеновской дифрактометрии с помощью дифрактометра ARL X'TRA. Скорости осадконакопления оценивались методом радиометрического датирования по избыточному атмосферному Pb-210 по модели Constant Rate of Supply (CRS) с допущениями, что атмосферное поступление Pb-210 в ДО постоянно; скорость осадконакопления в пределах рассматриваемого промежутка времени (одной пробы) не меняется, а также нет постседиментационной миграции радиоактивных элементов [17, 18]. Проверка оценок датирования проводилась по активностям Cs-137 по маркирующим горизонтам. Использование модели CRS обусловлено тем, что малые озера почти полностью избавлены от перемешивания верхних слоев донных осадков и, как следствие, от перераспределения вещества, что дало необходимые допущения и необходимую точность для модели CRS. Измерения проведены на гамма-спектрометре колодезного типа на коаксиальном детекторе из сверхчистого германия (HPG) с предусилителем и низкофоновым криостатом EGPC 192-P21/SHF 00-30A-CLF-FA (Eurysis Mesures, Франция). Элементный состав органической части ДО изучался органическим элементным анализом Прегля – Дюма [19, 20] на анализаторе CHNS/O PE 2400 Series II (Perkin Elmer) в аналитическом центре Института почвоведения и агрохимии СО РАН (Новосибирск).

Поскольку прямые измерения депонирования углерода на больших территориях и сложных биоценозах в большинстве случаев невозможны (разность между чистой первичной продуктивностью гидробионтов и гетеротрофным дыханием – эмиссия CO_2 в атмосферу в результате минерализации органического вещества), авторами применен метод расчета скорости депонирования углерода через скорости накопления осадка. Для этого использовался стратиграфически неизмененный стратифицированный разрез ДО: он датировался комплексом геохронологических методов, скорость осадконакопления определялась и умножалась на содержание углерода в пробе осадка, накопленного за датируемый период. Для расчетов депонирования бралась средняя скорость осадконакопления за весь промежуток возможных измерений (100-120 лет). Для 16 озер определение углерода проводилось по стратифицированным горизонтам с шагом 3-5 см методом CHNS-анализа Прегля – Дюма. Анализ показал, что количество органического углерода в ДО

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

мало изменчиво и имеет значимую положительную корреляцию с количеством органического вещества от общей массы осадка. Для остальных озер определение углерода проводилось по средней пробе методом CHNS-анализа Прегля – Дюма и проверкой методом потерь при прокаливании по стратифицированным горизонтам с шагом 3-5 см. Данные о содержании углерода в статье представлены как средние значения для всего керна. Данные о скоростях депонирования представлены для верхних частей керна до глубины датирования (в среднем до 60 см). Общие запасы углерода определены с учетом влажности и плотности осадка методами геологоразведочных работ как среднее содержание углерода, умноженное на запасы сапропеля на площадь в 1 га.

Запасы сапропеля определены как произведение объема и выхода сапропеля при 60 % влаги с дальнейшим пересчетом на сухое вещество. Выход сапропеля определен по формуле:

$$P_{60\ \%} = V\,(100 - W_{\text{есть}})/(100 - W_{\text{усл}}),$$

где V – объем сапропеля, тыс. м^3; $W_{\text{есть}}$, $W_{\text{усл}}$ – естественная, условная влажность сапропеля, равная 60 %.

Расчет захороненного органического углерода считался при допущении, что видовой состав биоты и/или соотношение C/H/N органической части не меняются либо меняются незначительно со временем, и проведен по формуле:

$$C_{\text{орг}} = P_{\text{сух}}N/100 \cdot L/100,$$

где $P_{\text{сух}}$ – запасы сухого сапропеля; N – процент органического вещества; L – процент углерода в органической части.

Расчет углерода, захороненного в карбонатах, производился для кальцита и для доломита по формулам:

$$C_{\text{мин}} = P_{\text{сух}}Z/100 \cdot 0{,}3K_{\text{Ca}}/100;$$

$$C_{\text{мин}} = P_{\text{сух}}Z/100 \cdot 0{,}375K_{\text{Ca,Mg}}/100,$$

где $P_{\text{сух}}$ – запасы сухого сапропеля; Z – зольность; K_{Ca} – содержание Ca в сухой пробе в карбонатах; $K_{\text{Ca,Mg}}$ – 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 1 га по формуле:

$$V = vS,$$

где v – скорость осадконакопления; S = 1 га (10000 м^2).

Материалы и обсуждение результатов

На данный момент единой классификации ДО в России и мире не существует. Многообразие классификаций и типологических характеристик ДО обусловлено разными целями и задачами в исследованиях специалистов различных направлений науки: геологии, географии, химии, биологии, экологии и др. Для классификации ДО в наших исследованиях использована классификация Н.В.Кордэ [21] с доработками В.Д.Страховенко [15]. В ней выделение типов сапропеля производится по зольности (соотношение органической и минеральных частей): «Органогенный сапропель зольностью до 30 %; органоминеральный 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 %» [15]. 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. ДО исследуемых озер в преобладающих случаях представлены сапропелями разных типов и классов (рис.2). Среднее значение зольности 65,3 %, стандартное отклонение 19,2 %, минимальное значение 15,5 %, медиана 66,6 %, максимальное значение 95 %. На рис.2 представлена диаграмма с распределением ДО исследуемых озер по классам и типам.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

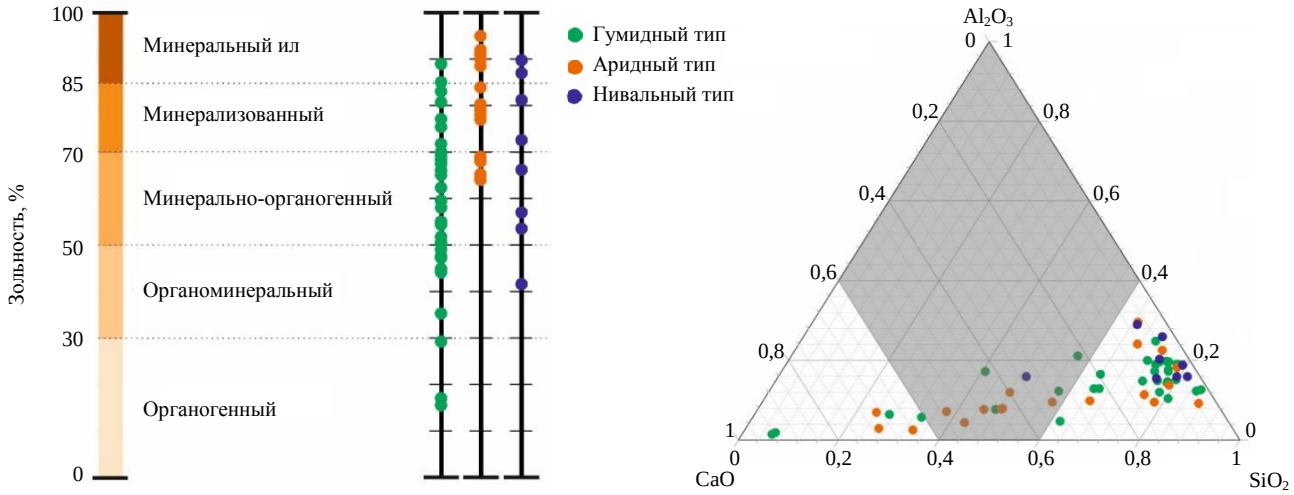


Рис.2. Диаграммы распространенности типов и классов сапропелей в озерах, расположенных в условиях аридного, нивального, гумидного типов седиментогенеза

Как показали предыдущие исследования [15-17], минеральный состав изученных озер представлен терригенной, биогенной, хемогенной и биохемогенной составляющими. В терригенной преобладают кварц и полевые шпаты – альбит, олигоклаз, калиевый полевой шпат, слюды (мусковит), хлориты (Fe~Mg), иллиты (Fe~Mg). В виде примесей могут присутствовать роговая обманка, актинолит, эпидот и акцессорные минералы. Зерна хорошо сортированы, неокатаны или слабоокатаны, пелитовой, алевропелитовой и реже псаммитовой (для горных районов) размерности. Биогенная фракция представлена створками диатомей – SiO_2 (аморф.) (рис.3), обломками кальцитовых и арагонитовых раковин и минерализованными остатками макрофитов как кремнистого, так и карбонатного составов. Пирит неравномерно распределен по всей колонке, иногда слагает тонкие слойки, гнездовые обособления, и местами образует неравномерную вкрапленность среди других минералов обломочной фракции донного осадка (рис.3). Фрамбоиды пирита представляют собой сферические агрегаты плотноупакованных микрокристаллов округлой формы. Также широко распространены карбонатные образования (кальцит-доломитового ряда, арагонит, изредка сидерит, родохрозит, магнезит) от микронных «творожистых» выделений (рис.3) до крупных строматолитовых образований в десятки сантиметров (рис.4). Генезис карбонатов полигенный (аутигенный) – биогенный, биохемогенный, хемогенный. Установление генезиса карбонатов в каждом конкретном случае – сложная комплексная задача.

Согласно данным, полученным от гидробиологов (ИВЭП СО РАН), работающих в общей экспедиции по отбору проб, основными источниками органического вещества в ДО являются бактерии, фитопланктон, зоопланктон, а также высшие растения, как водные, так и прибрежные [22, 23]. Биологическое разнообразие и структура водных сообществ существенно варьируются от одного озера к другому, что обуславливает значительные различия во вкладе различных групп организмов в накопление органического вещества и, соответственно, влияет на химический состав отложений. Наибольшая продукция органического вещества отмечается в озерах, находящихся в условиях гумидного типа седиментогенеза. Тем не менее, во всех исследованных водоемах, включая высокогорные олиготрофные озера, процессы продукционного накопления органики превосходят процессы ее разрушения [22, 23].

Для оценки соотношения поступления автохтонного и аллохтонного органического вещества используется отношение C/N. 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. Благодаря чему по соотношению C/N в ДО можно качественно определить источник поступления органического вещества. Для исследуемых озер среднее соотношение C/N = 13±3, что говорит о смешанном автохтонном веществе. Для 16 озер исследован не только элементный, но и групповой состав органического вещества ДО методом последовательной

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Г.И.Малов, В.Д.Страховенко, Е.А.Овдина, В.И.Малов, 2026

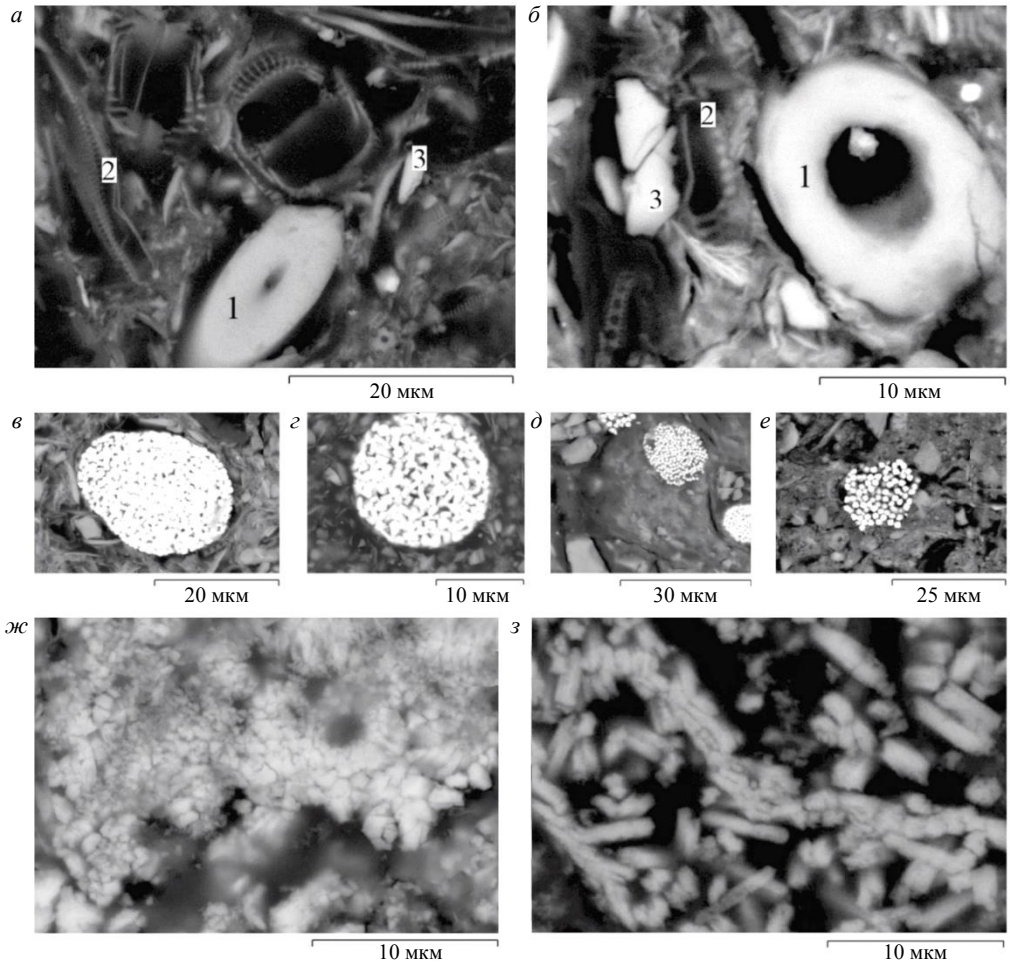


Рис.3. Минеральный состав донных отложений: *а* – донный осадок оз. Базовое Щучье (гумидный тип седиментогенеза); *б* – донный осадок оз. Подкова (нивальный тип); *в* – фрамбоид пирита на начальном этапе формирования в ДО оз. Теплый ключ в нивальном седиментогенезе; *г* – фрамбоид пирита в оз. Малое Тархатинское в нивальном седиментогенезе; *д* – фрамбоиды пирита в ДО оз. Базовое Щучье в гумидном седиментогенезе; *е* – фрамбоид пирита в ДО оз. Танатар 6-й в аридном седиментогенезе; *ж* – «творожистые» агрегаты низко-Mg кальцита (оз. Бирюзовое); *з* – призматические агрегаты низко-Mg кальцита (оз. Танатар 4-й). Фотография выполнена на СЭМ MIRA 3 Tescan, BSE

1 – остатки макрофитов ($m SiO_2 \cdot n H_2O$); 2 – створки диатомей ($m SiO_2 \cdot n H_2O$); 3 – в ассоциации с агрегатами минералов терригенной фракции

экстракции [15]. Биологический состав сапропеля определен коллегами из ИВЭП СО РАН [21, 23] с помощью поставленных экспериментов с седиментационными ловушками для определения качественного состава осаждающейся озерной взвеси и количественных параметров (потоки вещества на единицу площади дна). Все исследования показали, что аллохтонная составляющая вносит небольшой вклад в углеродный бюджет, а основным источником органического углерода является автохтонное вещество.

В табл.1 представлены исходные данные, необходимые для расчета скоростей депонирования углерода в исследуемых озерах. В выборке изученных озер зольность донных отложений изменяется от 15,5 до 92 % при среднем значении 61,5±18,3 %, медиане 64,9 %. Содержание органического углерода варьируется от 1,1 до 45,4 %, среднее составляет 21,0±11,3 %, медиана – 20,0 %, Влажность донных отложений варьируется от 20 до 89 % при среднем 71,2±11,6 % и медиане 71 %.



Рис.4. Строматолитовые образования (кальцит), оз. Петухово

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 1

Исходные данные для расчета скоростей депонирования углерода

Озеро	Зольность, %	С, %	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

Скорость осадконакопления в озерах составляет: от 2,1 до 4 мм/год для озер, находящихся в условиях нивального типа седиментогенеза; от 1 до 6,4 мм/год для озер в условиях гумидного типа; от 1,7 до 3,4 мм/год для озер в условиях аридного типа (рис.5). Поскольку территория исследования была подвержена выпадению радиоактивных осадков от испытаний ядерного оружия на Семипалатинском полигоне, дополнительно проводилась оценка скоростей осадконакопления по маркирующим горизонтам Cs-137 (рис.6).

Изучение вещественного состава ДО позволило установить, что поступление и захоронение углерода в озера в основном определяется двумя процессами – осаждением автохтонного и аллохтонного органического вещества ($C_{орг}$) и образованием аутигенных карбонатов ($C_{карб}$) [15, 17, 21, 22].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© Г.И.Малов, В.Д.Страховенко, Е.А.Овдина, В.И.Малов, 2026

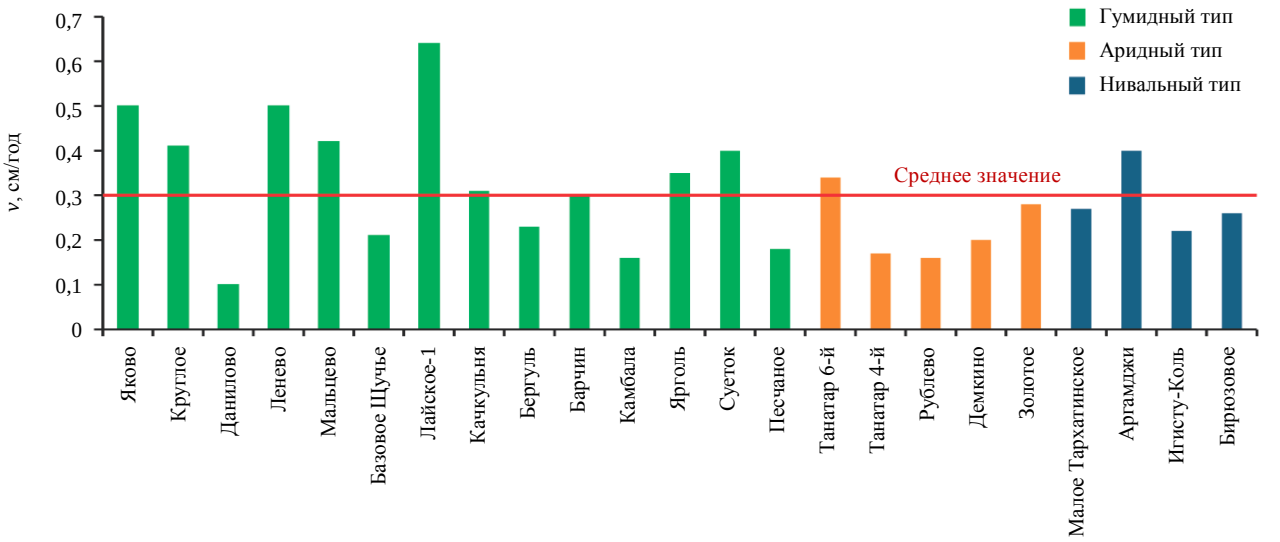


Рис.5. Диаграмма скоростей осадконакопления для изученных озер, расположенных в условиях нивального, гумидного и аридного седиментогенеза

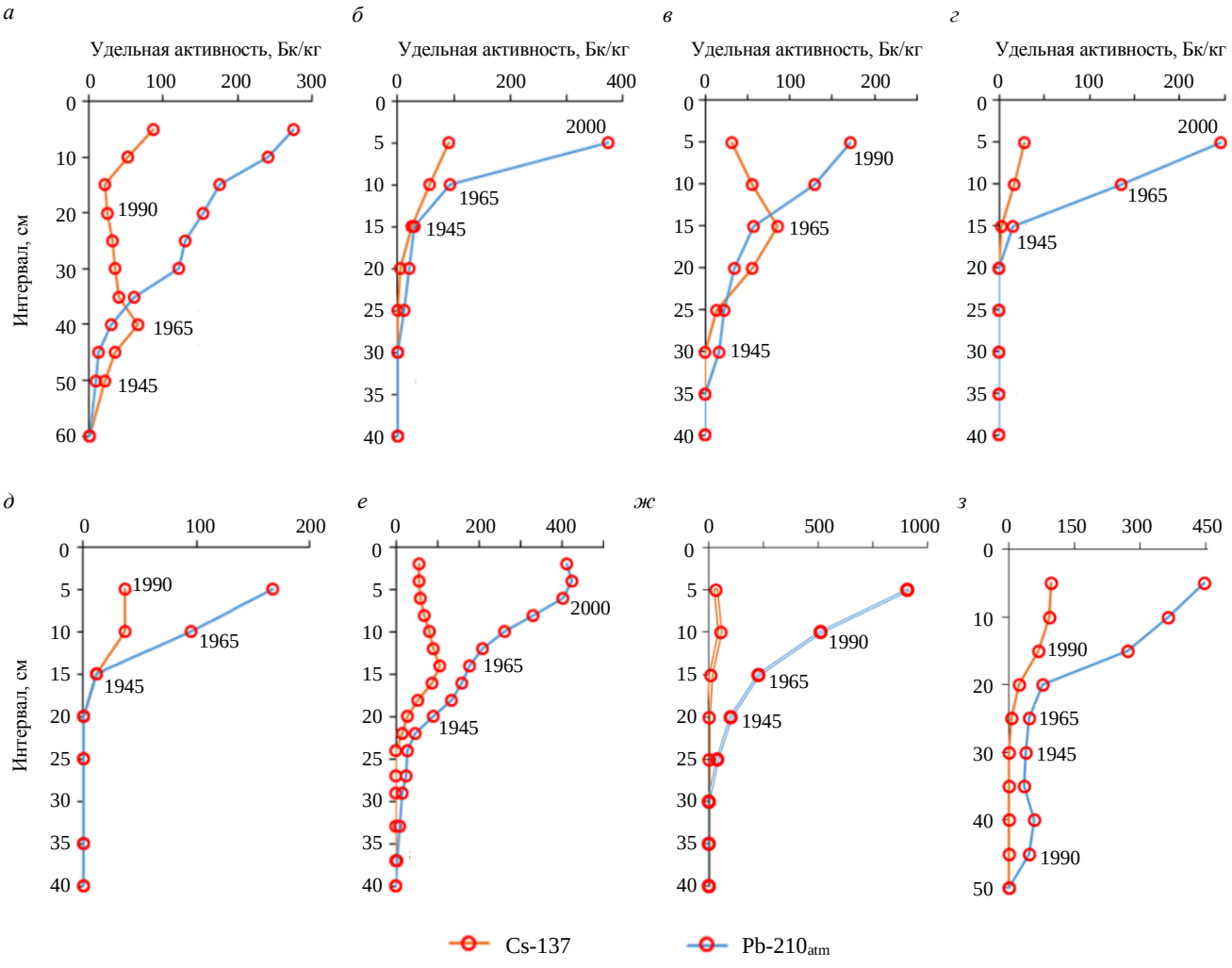


Рис.6. Графики распределения Pb-210 и Cs-137 для изученных озер в различных ландшафтах в условиях разного типа седиментогенеза: *а* – оз. Лайское – 5,4 мм/год, гумидный тип, тайга; *б* – оз. Данилово – 1,9 мм/год, гумидный тип, тайга; *в* – оз. Барчин – 3,2 мм/год, гумидный тип, лесостепь; *г* – оз. Камбала – 1,6 мм/год, гумидный тип, лесостепь; *д* – оз. Танатар – 1,7 мм/год, аридный тип, степь; *е* – оз. Золотое – 2,9 мм/год, аридный тип, ленточный бор; *ж* – оз. Бирюзовое – 2,6 мм/год, нивальный тип, среднегорье; *з* – оз. Аргамджи – 4 мм/год, нивальный тип, высокогорье

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Во всех ландшафтных зонах среди ДО малых озер выявлены сапропели, в которых значительную часть ДО составляют карбонаты, способные эффективно захоранивать углерод. С целью сравнительного анализа соотношений органического и минерального углерода (карбонатного) проведена оценка на 15 озерах (табл.2). Как видно из табл.2, даже для высокозольных сапропелей содержание карбонатного углерода не превышает 22 % от общего пула углерода в ДО. Наибольшие значения характерны для озер с минерализованным кальциевым и смешанным сапропелем (Рублево, Демкино, 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 ДО.

Таблица 2

Содержание органического и карбонатного углерода в ДО малых озер

Озеро	Зольность, %	$C_{орг}$, %	$C_{карб}$, %
Гумидный тип седиментогенеза			
Качкульня	17	99,8	0,2
Ярголь	35	99,1	0,9
Малое 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 деревни Северка)	79	91,2	8,8
Нивальный тип седиментогенеза			
Бирюзовое	81	85,2	14,8
Подкова	41	99,29	0,71

Данные о скоростях депонирования углерода хорошо соотносятся с данными Н.И.Ермолаевой, Е.Ю.Зарубиной и Г.В.Феттер по продуктивности гидробионтов в изученных озерах [22, 23]. По первичной продукции наибольшие значения характерны для озер, расположенных на территориях с гумидным типом седиментогенеза (таежная зона, лесостепь), а минимальные – для низкопродуктивных степных и средне-высокогорных озер нивального типа седиментогенеза. Усредненные значения по скоростям депонирования углерода для ДО составляют 560 г/м^2 в год для озер, локализованных в условиях гумидного типа, 300 и 340 г/м^2 в год для озер, локализованных в условиях аридного и нивального типов седиментогенеза соответственно. Усредненные значения по скоростям депонирования углерода в малых озерах юга Западной Сибири составляют 462±29 г/м^2 в год, минимальные значения относятся к оз. Кротова Ляга (степь, аридный тип седиментогенеза) – 50 г/м^2 в год, максимальные соответствуют оз. Яково (таежная зона, гумидный тип седиментогенеза) – 1110 г/м^2 в год.

При этом в каждой ландшафтной зоне озер, расположенных в условиях конкретного типа седиментогенеза, присутствуют озера с достаточно высокими и низкими скоростями депонирования углерода. На основе этого можно утверждать, что лимитирующими факторами, влияющими на скорости депонирования углерода, помимо региональных, являются локальные условия. Примером могут служить озера, локализованные на территориях с гумидным типом седиментогенеза (Песчаное, Канкуль, Щучье-Л), где либо благодаря активным процессам аутигенного минерало-

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

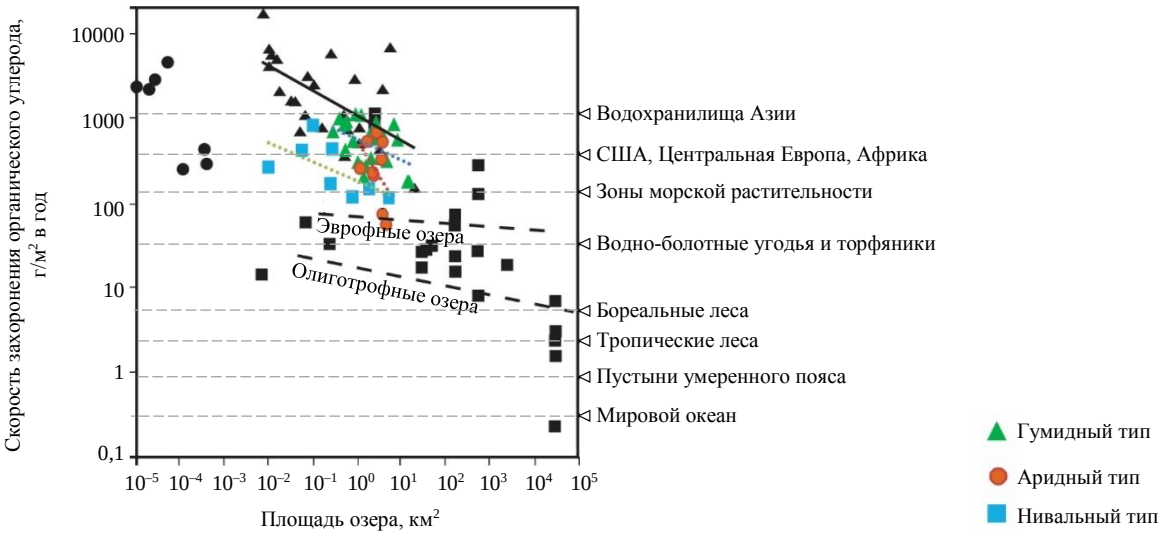


Рис.7. График сравнения скорости захоронения органического углерода в отложениях озер, находящихся в условиях различного типа седиментогенеза (данные авторов нанесены цветными фигурами на график [24]).
Стрелки справа указывают средние уровни поглощения углерода в различных типах экосистем [3, 25, 26]

образования формируются высокозольные сапропели с низким количеством органического углерода, либо вследствие низких скоростей депонирования углерода накапливается малое количество органического углерода. В сапропелевую залежь оз. Иткуль при высокой биопродуктивности озера (1,1 г/м^2 в день), значимый вклад вносят диатомовые водоросли, створки которых состоят из аморфного кремнезема ($SiO_{2биo}$), за счет чего образуются высокозольные сапропели (85 %), что разубоживает количество органического вещества в определенном объеме и, как следствие, отрицательно влияет на скорости депонирования углерода. В условиях нивального и аридного типов седиментогенеза находятся озера с достаточно высокими содержаниями органического вещества в ДО (оз. Аргамджи – 47 % и оз. Куклей – 36 %). Связано это с ураганной продуктивностью озер [24], которая также определяет высокие скорости депонирования углерода.

График сравнения скорости захоронения органического углерода в отложениях изученных озер с данными других исследователей и со средними уровнями поглощения углерода в различных типах экосистем представлен на рис.7.

Полученные оценки для озер юга Западной Сибири соответствуют данным других внутриконтинентальных водных объектов в мире [27-31] и превышают средние значения по скоростям депонирования углерода на шельфе и для болот. 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 [32].

Поскольку отсутствуют данные о скоростях депонирования углерода в озерах для территории Западной Сибири, решено дополнительно сопоставить полученные значения со скоростями депонирования углерода в торфах. В научных статьях Е.А.Головацкой с соавторами проведены оценки захоронения углерода в болотах южно-таежной подзоны Западной Сибири – скорость депонирования углерода составляет в среднем 0,19 т/га в год и изменяется от 0,11 до 0,26 т/га в год [9]. По данным других ученых, скорости захоронения углерода для торфов равны 0,24-0,56 т/га в год [33], а для болот на территории бывшего СССР – 0,12-0,8 т/га в год [34]. 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 (рис.7) [3, 25, 26].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

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) [32], что значительно меньше скоростей осадконакопления в озерах, рассчитанных в работе.

Заключение

Исследование показало, что малые озера юга Западной Сибири являются эффективными аккумуляторами углерода со средними скоростями депонирования на уровне 462±29 г/м^2 в год, что сопоставимо с глобальными значениями в других регионах мира и превышает аналогичные показатели торфяников территории Западной Сибири. Общий объем секвестрации углерода в ДО малых озер юга Западной Сибири различается как в региональном, так и локальном пространственном масштабе, не зависит от типа седиментогенеза и варьируется от 0,6 до 11,2 т/га в год.

Основная доля углерода фиксируется в виде органического вещества, несмотря на широкое развитие карбонатных минералов. Пространственных ландшафтных закономерностей захоронения карбонатного углерода 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 ДО.

Основные факторы, определяющие объем секвестрации углерода – скорость осадконакопления, соотношение процессов продукции и деструкции органического вещества, процессы аутигенного минералообразования.

Полученные данные актуализируют необходимость включения малых озер в глобальные модели углеродного цикла.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W. et al.* Global Carbon Budget 2024 // Earth System Science Data. 2025. Vol. 17. Iss. 3. P. 965-1039. DOI: 10.5194/essd-17-965-2025

2. *Weifeng Xu, Yaofei Cheng, Mengyuan Luo et al.* Progress and Limitations in Forest Carbon Stock Estimation Using Remote Sensing Technologies: A Comprehensive Review // Forests. 2025. Vol. 16. Iss. 3. № 449. DOI: 10.3390/f16030449

3. *Mendonça R., Müller R.A., Clow D. et al.* Organic carbon burial in global lakes and reservoirs // Nature Communications. 2017. Vol. 8. № 1694. DOI: 10.1038/s41467-017-01789-6

4. *Casas-Ruiz J.P., Bodmer P., Bona K.A. et al.* Integrating terrestrial and aquatic ecosystems to constrain estimates of land-atmosphere carbon exchange // Nature Communications. 2023. Vol. 14. № 1571. DOI: 10.1038/s41467-023-37232-2

5. *Ljung K., Lin S.* Organic Carbon Burial in Constructed Ponds in Southern Sweden // Earth Science, Systems and Society. 2023. Vol. 3. Iss. 1. № 10061. DOI: 10.3389/esss.2023.10061

6. *Cael B.B., Seekell D.A.* Simple model of morphometric constraint on carbon burial in boreal lakes // Frontiers in Environmental Science. 2023. Vol. 11. № 1101332. DOI: 10.3389/fenvs.2023.1101332

7. *Chmiel H.E., Kokic J., Denfeld B.A. et al.* The role of sediments in the carbon budget of a small boreal lake // Limnology and Oceanography. 2016. Vol. 61. Iss. 5. P. 1814-1825. DOI: 10.1002/lno.10336

8. *Beilman D.W., MacDonald G.M., Smith L.C., Reimer P.J.* Carbon accumulation in peatlands of West Siberia over the last 2000 years // Global Biogeochemical Cycles. 2009. Vol. 23. Iss. 1. № GB1012. DOI: 10.1029/2007GB003112

9. *Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А., Веретенникова Е.Э. и др.* Оценка динамики баланса углерода в болотах южнотаежной подзоны Западной Сибири (Томская область) // Почвы и окружающая среда. 2022. Т. 5. № 4. № e194. DOI: 10.31251/pos.v5i4.194

10. *Polishchuk Y.M., Bogdanov A.N., Polishchuk V.Y. et al.* Size Distribution, Surface Coverage, Water, Carbon, and Metal Storage of Thermokarst Lakes in the Permafrost Zone of the Western Siberia Lowland // Water. 2017. Vol. 9. Iss. 3. № 228. DOI: 10.3390/w9030228

11. *Kuhn M.A., Varner R.K., Bastviken D. et al.* BAWLD-CH_4: a comprehensive dataset of methane fluxes from boreal and arctic ecosystems // Earth System Science Data. 2021. Vol. 13. Iss. 11. P. 5151-5189. DOI: 10.5194/essd-13-5151-2021

12. *Morris J., Sokolov A., Reilly J. et al.* Quantifying both socioeconomic and climate uncertainty in coupled human–Earth systems analysis // Nature Communications. 2025. Vol. 16. № 2703. DOI: 10.1038/s41467-025-57897-1

13. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000. Серия Алтае-Саянская. Лист N-44 – Новосибирск. Объяснительная записка. СПб: ВСЕГЕИ, 2015. 392 с.

14. *Страхов Н.М.* Основы теории литогенеза. В 3 томах. Т. 1. Типы литогенеза и их размещение на поверхности земли. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1960. 212 с.

15. *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

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

16. *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. 2022. Т. 67. № 8. С. 787-804. DOI: 10.31857/S0016752522080088

17. *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. 2023. Т. 54. № 4. С. 207-225. DOI: 10.31857/S2949178923040138

18. *Appleby P.G., Oldfield F.* The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment // Catena. 1978. Vol. 5. Iss. 1. P. 1-8. DOI: 10.1016/S0341-8162(78)80002-2

19. *Abril-Hernández J.M.* ^{210}Pb-dating of sediments with models assuming a constant flux: CFCS, CRS, PLUM, and the novel χ-mapping. Review, performance tests, and guidelines // Journal of Environmental Radioactivity. 2023. Vol. 268-269. № 107248. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2023.107248

20. *Зауэр Е.А.* Современные автоматические CHNS/O/X-анализаторы органических соединений // Аналитика и контроль. 2018. Т. 22. № 1. С. 6-19. DOI: 10.15826/analitika.2018.22.1.001

21. *Кордэ Н.В.* Биостратификация и типология русских сапропелей. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1969. 219 с.

22. *Зарубина Е.Ю., Феттер Г.В.* К гидролого-гидрохимической характеристике высокогорных озер бассейна реки Мульта (Горный Алтай) // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2020. Т. 59. № 4. С. 74-82. DOI: 10.24411/2410-1192-2020-15908

23. *Феттер Г.В., Ермолаева Н.И.* Влияние абиотических факторов на структуру зоопланктона малых озер юга Западной Сибири // Известия Алтайского отделения Русского географического общества. 2018. Т. 49. № 2. С. 95-103.

24. *Downing J.A.* Emerging global role of small lakes and ponds: Little things mean a lot // Limnetica. 2010. Vol. 29 (1). P. 9-24. DOI: 10.23818/limn.29.02

25. *Иванов Д.В., Осмелкин Е.В., Зиганшин И.И.* Пространственные закономерности накопления углерода, азота и фосфора в донных отложениях озер Чувашской Республики // Труды Карельского научного центра РАН. 2021. № 4. С. 108-118. DOI: 10.17076/lim1402

26. *Capelle D.W., Kuzyk Z.Z.A., Papakyriakou T. et al.* Effect of terrestrial organic matter on ocean acidification and CO_2 flux in an Arctic shelf sea // Progress in Oceanography. 2020. Vol. 185. № 102319. DOI: 10.1016/j.pocean.2020.102319

27. *Jones J.R., Pope-Cole K., Obrecht D.V. et al.* Carbon and nutrient sequestration in small impoundments: a regional study with global implications // Inland Waters. 2023. Vol. 13. Iss. 3. P. 374-387. DOI: 10.1080/20442041.2023.2265799

28. *Yulai Ji, Jiacong Huang, Qing Zhu et al.* Small Ponds as Carbon Emission and Burial Hotspots in Lowland Agricultural Landscape // Earth's Future. 2025. Vol. 13. Iss. 4. № e2024EF005441. DOI: 10.1029/2024EF005441

29. *Munroe J., Brencher Q.* Holocene Carbon Burial in Lakes of the Uinta Mountains, Utah, USA // Quaternary. 2019. Vol. 2. Iss. 1. № 13. DOI: 10.3390/quat2010013

30. *Skwierawski A.* Carbon Sequestration Potential in the Restoration of Highly Eutrophic Shallow Lakes // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. Vol. 19. Iss. 10. № 6308. DOI: 10.3390/ijerph19106308

31. *Jeffries M.J., Gilbert P.J., Taylor S. et al.* Organic carbon in British lowland ponds: estimating sediment stocks, possible practical benefits and significant unknowns // Hydrobiologia. 2023. Vol. 850. Iss. 15. P. 3225-3239. DOI: 10.1007/s10750-022-04972-z

32. *Таран О.П., Болтенков В.В., Ермолаева Н.И. и др.* Взаимосвязь химического состава органического вещества озерных систем и генезиса сапропелей // Геохимия. 2018. № 3. С. 269-279. DOI: 10.7868/S001675251803007X

33. *Бабиков Б.В., Кобак К.И.* Поглощение атмосферного углекислого газа болотными экосистемами территории России в голоцене. Проблемы заболачивания // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2016. № 1. С. 9-36. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.9

34. *Лапшина Е.Д.* Растительность болот юго-востока Западной Сибири. Ханты-Мансийск: Югорский государственный университет, 2010. 184 с.

***Авторы*: Георгий Игоревич Малов,** *младший научный сотрудник* (*Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-4150-4171*, **Вера Дмитриевна Страховенко,** *д-р геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник* (*Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*), *https://orcid.org/0000-0003-1350-2045*, **Екатерина Андреевна Овдина,** *канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник* (*Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*), *https://orcid.org/0000-0002-4920-8860*, **Виктор Игоревич Малов,** *канд. геол.-минерал. наук, научный сотрудник* (*Институт геологии и минералогии им. В.С.Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия*), malov@igm.nsc.ru, *https://orcid.org/0000-0002-2175-3971*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0