

## ГЕНЕЗИС ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОЗЕР ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ БАРАБИНСКОЙ НИЗМЕННОСТИ (юг Западной Сибири)

В.Д. Страховенко<sup>1,2</sup>, Е.А. Овдина<sup>1,2</sup>, Г.И. Малов<sup>1,2</sup>, Н.И. Ермолаева<sup>3</sup>,  
Е.Ю. Зарубина<sup>3</sup>, О.П. Таран<sup>4,5</sup>, В.В. Болтенков<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

<sup>3</sup>Институт водных и экологических проблем СО РАН, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1, Россия

<sup>4</sup>Институт химии и химической технологии СО РАН, 660649, Красноярск, ул. Маркса, 42, Россия

<sup>5</sup>Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 5, Россия

На основе многолетних комплексных исследований (в которых принимали участие геохимики, гидробиологи, почвоведы и химики) проведена количественная оценка особенностей фракционирования элементов в процессе осадконакопления. Аналитические исследования химического состава проб воды, почв, донных осадков, биоты проходили в Центре коллективного пользования научным оборудованием для многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (ЦКП МИИ СО РАН) и в Институте катализа СО РАН. На основе минералого-геохимического подхода выбраны озера с различным типом биогенетического формирования и класса органоминеральных отложений, и в них проведены детальные исследования взаимоотношений органической и минеральной частей осадка.

Установлено, что органоминеральные отложения различных классов и биогенетических типов формирования отличаются не только по содержанию главных элементов (Si, Ca, C, O), но и групповым составом органического вещества. Выявлено прямое влияние трансформации органического вещества на минеральный состав донных отложений. Содержания остальных элементов меняются в узком диапазоне. При этом различие в концентрациях элементов между органоминеральными отложениями разных типов и классов сопоставимы с аналогичными внутри одного класса. Основополагающую роль в формировании геохимического и минерального состава органоминеральных отложений малых озер играют сложные биологические, биохимические и физико-химические процессы, зависящие в основном от азональных факторов и протекающие в условиях длительного ледостава (в анаэробных условиях).

*Малые озера, органоминеральные отложения, Барабинская низменность.*

## GENESIS OF ORGANOMINERAL SEDIMENTS OF LAKES IN THE CENTRAL PART OF THE BARABA LOWLAND (south of West Siberia)

V.D. Strakhovenko, E.A. Ovdina, G.I. Malov, N.I. Ermolaeva,  
E.Yu. Zarubina, O.P. Taran, and V.V. Boltanov

A quantitative assessment of the fractionation of elements during sedimentation is made based on long-term comprehensive studies with the participation of geochemists, hydrobiologists, soil scientists, and chemists. Analytical studies of the chemical composition of water, soil, bottom sediments, and biota were carried out at the Center for Collective Use of Scientific Equipment for Multielement and Isotope Studies and at the Institute of Catalysis, Novosibirsk. Based on a mineralogical and geochemical approach, we chose lakes with different types of biogenetic formation and different classes of organomineral sediments and performed detailed studies of the relationship between the organic and mineral parts of the sediments.

It has been established that the organomineral sediments of different classes and biogenetic types of formation differ not only in the contents of major elements (Si, Ca, C, and O) but also in the group composition of organic matter. The direct effect of the transformation of organic matter on the mineral composition of bottom sediments has been revealed. The contents of other elements vary in a narrow range of values. At the same time, the difference in the contents of elements between organomineral sediments of different types and classes is comparable with their difference within a class. The leading role in the formation of the geochemical and mineral compositions of the organomineral sediments of small lakes belongs to intricate biological, biochemical, and physicochemical processes depending mainly on azonal factors and occurring under prolonged freezing-up (anaerobic conditions).

*Small lakes, Baraba Lowland, organomineral sediments*

## ВВЕДЕНИЕ

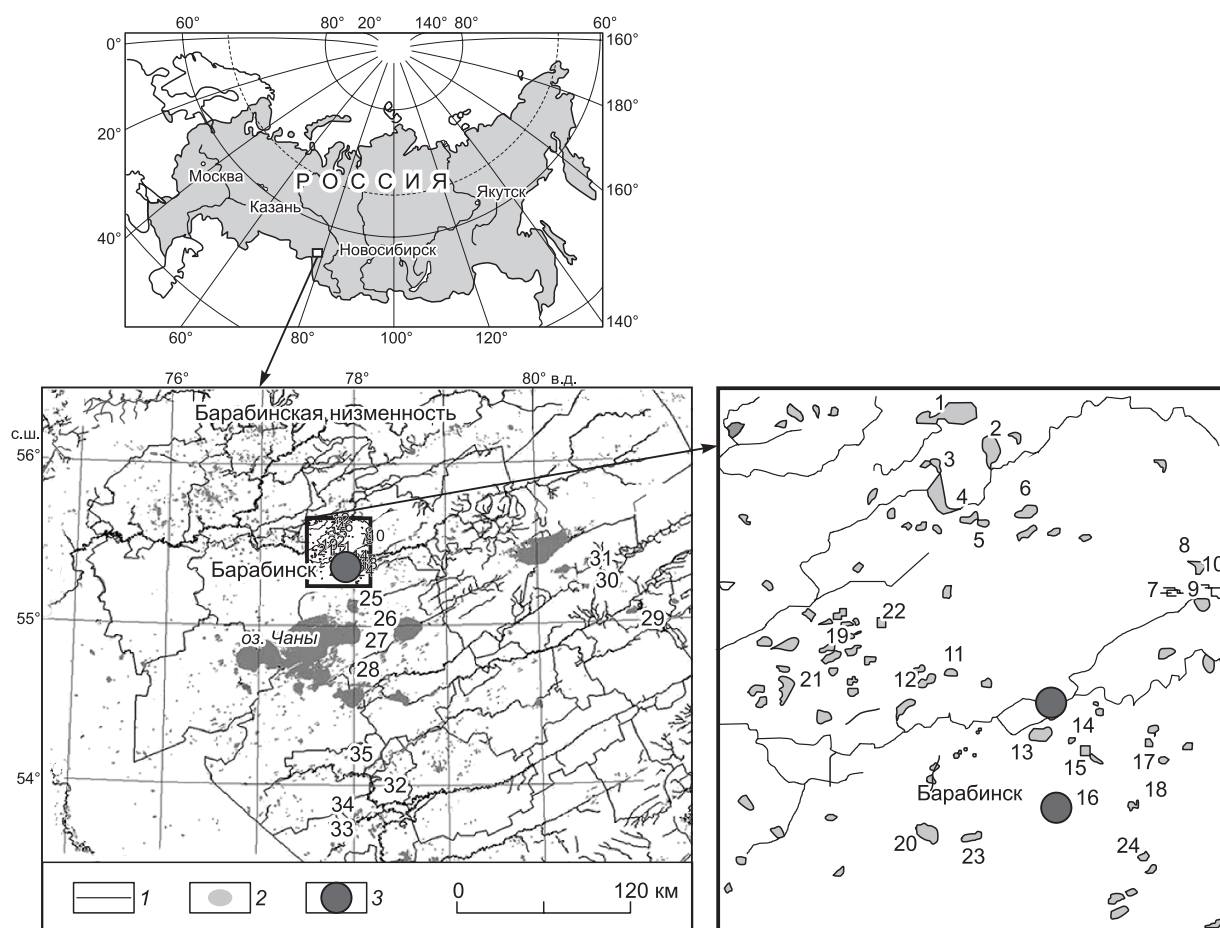
Количественная характеристика химического и минерального состава вещества органо-минеральных донных отложений остается одной из фундаментальных проблем геохимии седиментогенеза, к решению которой мы приближаемся по мере накопления фактического материала, появления новых данных, разработки специальных методов исследования.

**В настоящее время на фоне терригенного сноса и золовых процессов в малых озерах идет активное сапропелеобразование.** Одним из основных процессов сапропелеобразования является синтез органического и минерального материала и его трансформация. Согласно классификации фацально-генетических типов органического вещества, авторами которой были великие ученые Г. Потонье, Н.Б. Вассоевич, В.А. Успенский, О.А. Радченко, на протяжении многих лет органическое вещество осадочных пород и современных донных осадков подразделяли на два основных фацально-генетических типа — сапропелевое и гумусовое, понимая под этими типами соответственно органическое вещество низших и высших растений. В связи с совершенствованием методов исследования стало очевидным, что иногда органическое вещество низших растений по многим компонентам соответствует составу органического вещества высших растений и наоборот. В современной геохимии органического вещества установлено, что сапропелевое органическое вещество имеет сложный состав и наиболее информативным в генетическом плане является вещественно-петрографический состав органического вещества: т.е. соотношение трех биоценологических групп исходного материала — фитопланктона, фитобентоса и зоосоставляющей. Но со временем при изучении сапропелевых залежей как неметаллического полезного ископаемого появилась другая трактовка определения сапропеля, согласно которой сапропели образуются в анаэробных условиях в результате физико-химических и биологических преобразований остатков растительных и животных организмов при различной степени участия минеральных и органических компонентов, которые активно взаимодействуют друг с другом [Kemp et al., 1999; Helmond et al., 2015]. При таком определении в составе органического вещества донных отложений присутствуют продукты распада высшей водной растительности (макрофитов) и непосредственно захороненные остатки макрофитов. Поэтому в данной статье донные отложения малых озер Барабинской низменности будут отнесены к органо-минеральным илам, так как в основном они имеют смешанный состав органического вещества, но во всех этих озерах, согласно современному определению сапропеля как неметаллического полезного ископаемого, присутствуют сапропелевые залежи.

Существует много классификаций и типологических характеристик органо-минеральных отложений. Среди многочисленных современных публикаций по условиям образования, тенденциям размещения и химическим свойствам органо-минеральных отложений заслуживают внимание научные монографии и статьи [Лопотко, Евдокимова, 1986; Савченко, 2004; Штин, 2005; Холодов, 2006; Субетто, 2009; Курзо и др., 2012]; диссертации [Перминова, 2000; Кривонос, 2012; и др.]. Не останавливаясь на обсуждении этих публикаций, отметим, что они дают всестороннее представление о современном состоянии изучения донных осадков. По данным этих исследователей, основными поставщиками органического вещества в осадки являются бактерии, фитопланктон, зоопланктон, а также высшие растения как водные, так и околоводные. Состав и структура водных биоценозов от озера к озеру значительно отличаются друг от друга, так же как отличаются минерально-геохимический состав донных отложений и фацальные условия их захоронения. Эти, а также многие другие факторы предопределяют тип и класс органо-минеральных отложений малых озер вообще и озер Барабинской низменности, в частности. Элементный состав органического и минерального вещества донных отложений отражает условия их генезиса. Так, например, основными компонентами растений являются углеводы и лигнин. Белки преобладают в зоопланктоне. Фитопланктон, зоопланктон, бактерии и споры обогащены липидами и липоидами [Тетельмин, Язев, 2009]. Эти компоненты, входящие в состав живых организмов, отличаются друг от друга по элементному составу: только в белках присутствуют азот и сера, в углеводах содержится значительно больше кислорода, чем в других компонентах живого вещества, а липиды и липоиды наиболее обогащены углеродом и водородом [Романкевич и др., 2009].

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования послужили 35 малых континентальных озер, расположенных в центральной части Барабинской низменности, которая относится к территории Обь-Иртышского междуречья. На севере она переходит в Васюганскую равнину, на юге в Кулундинскую равнину, на западе граничит с юго-западной частью Тобол-Ишимской низменности, а на востоке с Приобской равниной. Барабинская низменность богата озерами, на ее территории насчитывается более 2500 озер общей площадью 4900 км<sup>2</sup>. Преобладают бессточные озера, господствующее положение (97.5 %) занимают малые водоемы размером до 2.5 км<sup>2</sup>. Для Барабинской низменности характерен своеобразный гривный рельеф — чередование параллельно простирающихся с ЮЗ на СВ удлиненных повышений (грив) и по-



**Рис. 1. Карта-схема исследуемых озер:**

1 — Барчин, 2 — Камбала, 3 — Казатово, 4 — Кайлы, 5 — Бергуль, 6 — Ярголь, 7 — Суеток, 8 — Бол. Курган, 9 — Бильгень, 10 — Сарбалык, 11 — Жилое-К, 12 — Мостовое, 13 — Бол. Кайлы, 14 — Песчаное, 15 — Чистое, 16 — Бугристое, 17 — Верхнее, 18 — Нижнее, 19 — Цыбово, 20 — Голдобинское, 21 — Мангазерка, 22 — Круглое, 23 — Шубинское, 24 — Новая опушка, 25 — Долгое, 26 — Жилое, 27 — Бол. Чича, 28 — Мал. Чича, 29 — Иткуль, 30 — Канкуль, 31 — Качкулья, 32 — Куклей, 33 — Кротовая ляга, 34 — Кусган, 35 — Мелкое. 1 — реки, 2 — озера, 3 — города.

нижений, в которых расположены многочисленные озера. Вследствие такого устройства поверхности происходит местное перераспределение влаги и легкорастворимых солей: их переток с грив в межгривное пространство. Почвообразующие породы представлены озерно-аллювиальными и субаэральными лессовидными отложениями преимущественно алевропелитового гранулометрического состава с разной степенью засоления. Климат района резко-континентальный. Среднегодовая температура воздуха колеблется от  $(-1 \text{ до } 0 \text{ } ^\circ\text{C})$  со среднемесячными максимумами в июле  $(+19...+20 \text{ } ^\circ\text{C})$  и минимумами в январе  $(-21...-22 \text{ } ^\circ\text{C})$ . Среднегодовое количество осадков составляет 350—375 мм.

Все исследованные озера по площади акватории — малые, мелководные, с глубиной до 2.5 м (рис. 1). В полевых условиях отбор проб воды для последующего анализа производился по стандартным методикам [ГОСТ 31861, 2012]. Отбор проб донных отложений (ДО) по [ГОСТ Р 54519, 2011]: место опробования выбирали вдали от населенных пунктов или на максимальном удалении от них, если они расположены в береговой зоне водоема, с участков ДО, исключающих перемешивание в результате антропогенной деятельности. При помощи цилиндрического пробоотборника с вакуумным затвором конструкции НПО «Тайфун», Россия (диаметр 82 мм, длина 120 см) отбирали колонку ДО с катамарана. Керна ДО опробовали послонно с шагом в 3 или 5 см, в зависимости от плотности осадка, на глубину от поверхности отложений на 50—250 см. Осадок взвешивали непосредственно после отбора, а затем высушивали до воздушно-сухого состояния в лабораторных условиях. Отбор почвенных проб осуществлялся металлическим кольцом на глубину всего почвенного разреза. Всего было отобрано: 42 разреза ДО озер и 19 разрезов почвенного покрова с общим количеством проб 564 и 131 соответственно; 56 проб воды и 27 проб почвообразующих пород. Дальнейшие исследования химического состава проб

воды, почв и ДО проходили в Центре коллективного пользования научным оборудованием для многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (ЦКП МИИ СО РАН), в лаборатории геохимии редких, благородных элементов и экогеохимии ИГМ СО РАН и в Институте катализа СО РАН. Детальное описание методов приведено в ранее опубликованных авторами статьях [Страховенко и др., 2014; Yermolaeva et al., 2016; Таран и др., 2018]. Изучение морфологии, фазового состава образцов ДО различных классов проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа MIRA 3 TESCAN, снабженного энергетическим спектрометром OXFORD XMAX 450+ (СЭМ).

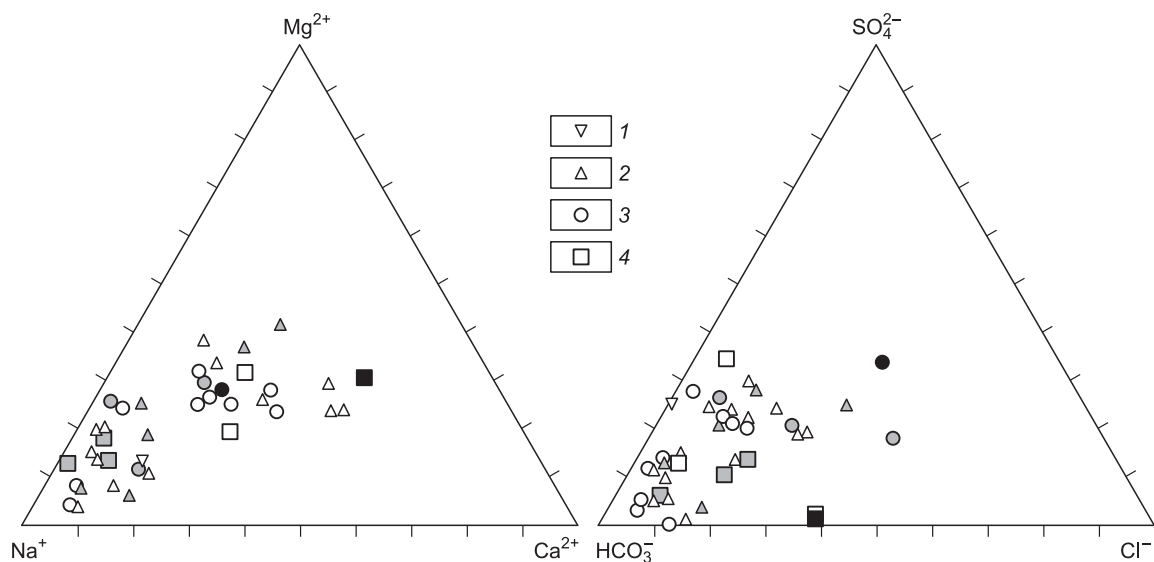
Групповой состав органического вещества определен методом последовательной экстракции по адаптированной методике, изложенной в работах [Юдина и др., 1998; Кривonos, 2012]. Предварительно высушенные и размолотые образцы сапропелей обрабатывали 0.05N раствором соляной кислоты для удаления ионов кальция (BP) [Таран и др., 2018]. Из декальцированных воздушно-сухих проб извлекали водорастворимые вещества (BB) кипячением в воде в течение 5 ч при соотношении образец : растворитель 1:100. Затем экстракцией спирт-бензольной смесью (1:1) в аппарате Сокслета выделяли битумы (БВ). Гуминовые вещества (ГВ) извлекали обработкой 0.1N раствором NaOH при температуре 20—25 °С методом настаивания в течение 24 ч, затем дополнительной экстракцией при 80 °С 0.02N раствором NaOH. Из отмытого от щелочи и высушенного остатка извлекали легкогидролизуемые вещества (ЛГВ) (гемицеллюлоза и азотистые соединения) двукратной обработкой 2 %-й соляной кислотой при 90 °С по 2.5 ч. Остаток отмывали и высушивали, а затем обрабатывали с целью выделения трудногидролизуемых соединений (ТГВ) (целлюлоза) 80 %-й серной кислотой в течение 2.5 ч и далее кипятили с 5 %-й серной кислотой 5 ч при соотношении 1:100. Оставшаяся часть представляла собой негидролизуемый остаток (НГО).

При проведении работ были отобраны пробы фито- и зоопланктона, исследована продукция макрофитов, проведены эксперименты по изучению первичной продукции фитопланктона и определению состава и обилия осаждающейся озерной взвеси (методом седиментационных ловушек). Параллельно измерялись физико-химические и гидрологические показатели: глубина, прозрачность, цветность, температура воды, концентрация растворенного в воде кислорода (титриметрическим методом) и биохимическое потребление кислорода за пять суток (БПК<sub>5</sub>). Методы отбора и обработки гидробиологических проб также приведены в ранее опубликованных статьях [Yermolaeva et al., 2016].

В настоящее время авторы располагают самой большой базой данных по аналитическим характеристикам органоминеральных ДО Новосибирской области, полученным в ходе полевых исследований и обобщений литературных данных, опубликованных до 2018 г. На основе минералого-геохимического и биогенетического подходов авторами проведена классификация изученных органоминеральных ДО. По зольности ДО разделены на четыре типа — *органогенный* с зольностью до 30 %; *органоминерализованный* — 30—50 %; *минерально-органогенный* — 50—70 %; *минерализованный* — 70—85 %. ДО со значением зольности выше 85 % относятся к *минеральным илам* [Штин, 2005]. Все типы органоминеральных ДО, кроме органического, по соотношению Si/Ca подразделены на три класса: *кремниевый* (Si > Ca); *кальциевый* (Ca > Si), *смешанный* (Si ~ Ca). На элементный и групповой состав автотонного ОВ органоминеральных ДО большое влияние оказывает преобладание в озерах разных групп водных организмов (фито-, бактерио- и зоопланктона или макрофитов). На основе доминирующей по биомассе группы организмов органоминеральные ДО разделены на планктонные, макрофитные и планктономакрофитные.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**Характеристика вод озер и почв водосборных площадей.** В зонах семиаридного климата лесостепи и степи Барабинской низменности происходит интенсивная аккумуляция легкорастворимых солей и в связи с этим на данных территориях идет формирование состава озерных вод всего спектра солености: от пресных до рассолов. Озера различаются по степени минерализации вод, значению pH, содержанию растворенного в воде кислорода, концентрации органического вещества (по БПК<sub>5</sub>), гидрокарбонатов, сульфатов, нитратов и фосфатов. Поскольку изученные озера мелководные, они не испытывают недостатка света и биогенных элементов. По содержанию главных ионов, воды этих озер в основном гидрокарбонатно-Mg-Na или гидрокарбонатно-Na (рис. 2). Воды изученных озер — щелочные, со значениями pH от 8.1 (оз. Бол. Казатово) до 10 (оз. Жилое-К). По значению общей минерализации озерные 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)). Следует отметить корреляцию значений Eh и pH для озерных вод, что объясняется сходными гидролого-геологическими условиями. Показатель Eh воды во всех изученных озерах положительный и достаточно высокий от 287 мВ (оз. Чистое) до 375 мВ (оз. Казатово). Это свидетельствует об окислительной обстановке. Содержание кислорода достаточно высоко и варьирует от 9.7 мг/л (оз. Камбала) до 6.5 мг/л (оз. Бугристое). Согласно полученным аналитическим данным и литературным источникам, в



**Рис. 2.** Диаграммы катионного и анионного состава вод изученных озер с учетом величины их общей минерализации вод в сопоставлении с типом органоминеральных отложений, образующихся в озере.

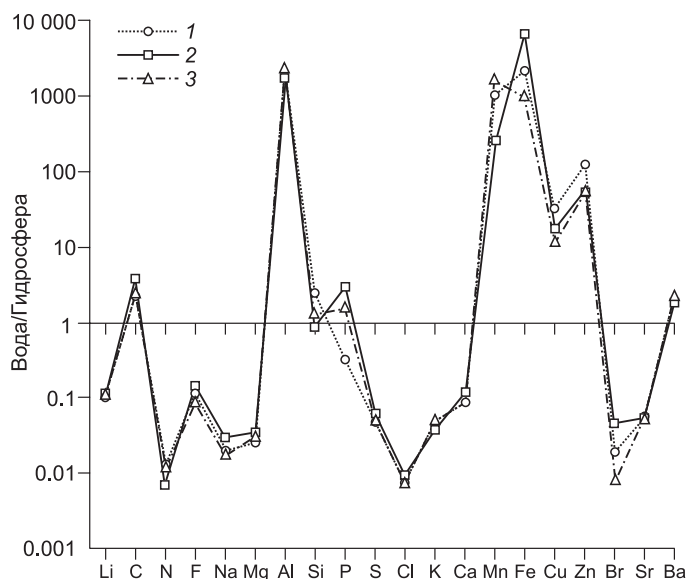
Общая минерализация вод озера: светлые знаки < 1 г/л; серые — 1.1—3.0 г/л; черные — > 3 г/л. Органоминеральные отложения, тип: 1 — органогенный, 2 — органоминерализованный, 3 — минерально-органогенный, 4 — минерализованный.

водах изученных озер концентрации элементов в основном ниже, чем их распространение в целом в гидросфере [Ярошевский, 2004], а для микроэлементов находятся на уровне значений, приведенных для северных озер Евразии [Reimann, Caritat, 1998]. Озерные воды обогащены группой элементов, которые обычно находятся в виде взвеси и/или взвесью сорбируются (Al, Fe, Mn, Cu, Zn). В озерных водах наблюдаются также более высокие, чем в гидросфере, значения углерода и фосфора (рис. 3).

Почвообразующие породы представлены озерно-аллювиальными и субаэральными лессовидными отложениями, преимущественно алевритового гранулометрического состава с разной степенью засоления. Так как почвообразующий субстрат представлен на всей исследуемой территории лессовидными суглинками, в составе которых резко преобладают кварц и полевые шпаты, то при выветривании высоконатриевых пород воды приобретают содовый состав. Площади водосбора имеют единые геохимические характеристики по почвам водосборных площадей, сгруппированных и рассчитанных для каждого класса сапропеля. Согласно полученным данным, содержание гумусовых соединений в верхней части профиля исследуемых почв колеблется в широких пределах. Даже в пределах одного водосборного бассейна степень их гумусированности меняется от низкой (0.9 %) до высокой (8.3 %). Минимальное количество гумусовых веществ обнаружено в лугово-болотной перегнойной почве (оз. Жилое-К у с. Мангазерка), а максимальное — в серой лесной типичной почве (оз. Бол. Кайлы). Изученные почвы имеют высокую водопроницаемость, низкую водоудерживающую способность и влагоемкость.

**Рис. 3.** Мультиэлементный спектр усредненных содержаний элементов в водах озер, сгруппированных по классам органоминеральных отложений, нормированные на содержания элементов в гидросфере, по [Ярошевский, 2004].

1 — кремниевый, 2 — кальциевый, 3 — смешанный.



Практически повсеместно в почвенных профилях встречаются мицели карбонатов (от 22.0 до 0.6 %), которых особенно много в нижних почвенных горизонтах.

**Минеральный и геохимический состав органоминеральных ДО.** Все отобранные пробы ДО имеют синевато-зеленый или табачно-коричневый цвет, высокую вязкость (преимущественно в нижних горизонтах), гомогенизированную массивную или орехово-скорлуповатую текстуру, иногда встречаются остатки растительности. Влажность по разрезу меняется от 98 до 70 %.

Для детального исследования взаимоотношений органической и минеральной частей осадка выбрана восемь озер с различным типом биогенетического формирования и класса органоминеральных ДО: Качкульня, Барчин, Песчаное, Бол. Кайлы, Ярголь, Камбала, Мал. Мензелинское и Цыбово (табл. 1).

Озера с кальциевым и смешанным классом ДО по уровню развития фитопланктона относятся к мезотрофным и мезотрофно-эвтрофным водоемам с доминированием по биомассе цианобактерий. Вероятнее всего, кальцификация цианобактерий, как и погруженных гидрофитов, связана с фотосинтезом растений, вследствие которого изменяется не только газовый режим, но и карбонатное равновесие в сторону образования труднорастворимых солей кальция на поверхности растений [Лукина, Смирнова, 1988; Билан, Усов, 2001]. Цианобактерии практически не утилизируются в трофической цепи и, отмирая, как и погруженные растения, обогащают ДО кальцием. Для озер этого типа характерен бордюрный и займищный типы зарастания с доминированием воздушно-водной растительности, представленной сообществами тростника (*Phragmites australis* (Cav.) Trin ex Steud.) и рогоза узколистного (*Typha angustifolia* L.) при площади зарастания от 10 до 85 %. Воздушно-водные растения вносят значительный вклад Са в ДО. Наибольшей способностью к накоплению Са обладает тростник [Schoelynck et al., 2010]. Согласно данным ряда исследователей [Гришанцева и др., 2010; Гашкина и др., 2012], в надземных органах тростника содержится от 4.9 до 15.0 мг/г сухого веса кальция. Учитывая, что величина образуемой сообществами тростника биомассы в период максимального развития на этих озерах составляет в среднем 1284 г/м<sup>2</sup> в абсолютно-сухом весе, то в ДО ежегодно при разложении тростника попадает от 6.3 до 19.2 г/м<sup>2</sup> Са. Зоопланктон озер с кальциевым типом осадка представлен в основном мелкими фильтрующими Cladocera. Как правило, доминируют *Bosmina longirostris* (Müller) и *Chydorus sphaericus* (Müller). Продукция зоопланктона составляет 66 200—190 000 мг/м<sup>3</sup>год.

В озерах с кремниевым классом ДО значительную долю в фитопланктоне составляют диатомовые водоросли, створки которых содержат кремний. По типу зарастания озера этого класса делятся на две группы: озера с бордюрным и озера с массивно-зарослевым типами зарастания. В озерах с бордюрным типом зарастания в литоральной зоне доминирует воздушно-водная растительность (*Phragmites australis*, *Typha angustifolia* L.) при площади зарастания до 15 %. Тростник способен накапливать за вегетационный сезон в надземных органах до 14 мг Si/г сухого веса [Schoelynck et al., 2010; Гришанцева и др., 2010]. Величина фитомассы (в абсолютно сухом весе), образованной тростником в этой группе озер в среднем достигает 1133 г/м<sup>2</sup> в год, следовательно, при разложении тростника в литоральной зоне озер в ДО может поступать до 15.9 г/м<sup>2</sup> Si в год. В группе озер с массивно-зарослевым типом основная часть акватории водоема зарастает погруженной растительностью (до 40–70 %). Доминируют сообщества роголистника (*Ceratophyllum demersum* L.), рдестов (*Potamogeton pectinatus* L., *P. perfoliatus* L. и *P. macrocarpus* Dobroch.), телореза (*Stratiotes aloides* L.), урути (*Myriophyllum sibiricum* Kom.). Величина фитомассы, образованной воздушно-водной растительностью, составляет 934—2419 г/м<sup>2</sup>, погруженной — от 8 до 752 г/м<sup>2</sup>. По данным [Schoelynck et al., 2010], погруженные растения содержат Si от 7 до 28 мг/г сухого

Таблица 1.

**Географические координаты озер, классификация органоминеральных отложений в озере по типу и классу**

Озеро	Координаты		Зольность, %	Тип	Класс
	с. ш.	в. д.			
Барчин	55°41'990	78°09'370	40	Органоминеральный Планктономакрофитный	Кальциевый
Песчаное	55°24'326	78°20'868	40	»	»
Мал. Мензелинское	55°34'390	83°16'070	45	Органоминеральный макрофитный	Смешанный
Качкульня	55°14'528	80°34'791	17	Органогенный макрофитный	Кремниевый
Камбала	55°40'733	78°11'234	56	Минерально-органогенный Планктономакрофитный	»
Цыбово	55°30'673	77°58'808	48	»	»
Бол. Кайлы	55°25'193	78°17'356	40	Органоминеральный планктономакрофитный	Смешанный
Ярголь	55°36'078	78°21'550	34	Органоминеральный макрофитный	»

Таблица 2. Химический состав (мас. %) органического вещества и минеральной части ДО

Озеро	Зольность, %	C	H	O	N	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	
<b>Кальциевый класс ДО</b>																
Барчин	40	14	2.0	11	1.2	1.9	11.2	1.7	1.0	1.4	20	0.3	0.3	0.2	3.0	
Песчаное	40	19	2.2	16	1.4	1.4	15.4	4.1	2.4	1.9	15	0.8	0.5	0.2	4.1	
Мал. Мензелинское	45	25	3.2	16	2.1	0.5	11.2	1.7	2.2	0.7	22	0.2	0.2	0.6	2.1	
<b>Кремниевый класс ДО</b>																
Качкульня	17	36	4.2	27	2.5	3.8	7.2	1.2	0.8	1.4	3	0.3	0.2	0.1	1.8	
Камбала	56	12	1.6	12	0.8	1.0	37.5	6.8	3.6	1.3	3	0.5	1.2	0.2	1.2	
Цыбово	48	16	1.9	10	1.4	1.4	32.5	6.5	2.9	1.6	3	0.6	1.2	0.3	1.3	
<b>Смешанный класс ДО</b>																
Бол. Кайлы	40	20	2.6	12	1.6	1.4	22.9	4.5	2.4	1.2	6	0.9	0.7	0.5	1.5	
Ярголь	34	23	3.0	18	2.1	1.6	27.0	6.5	2.3	0.8	7	1.4	1.8	0.9	3.8	

веса. Максимальное содержание Si отмечено в роголистнике, урути и рдестах. Таким образом, в ДО озер ежегодно при разложении тростника поступает до 34.9 г/м<sup>2</sup>, роголистника — до 6.1 г/м<sup>2</sup>, рдеста пронзеннолистного — до 0.2 г/м<sup>2</sup> Si. В зоопланктоне озер с кремнистым типом сапропеля основу комплекса ветвистоусых рачков составляют *Ceriodaphnia quadrangula* (Müller), *Daphnia longispina* Müller, *Daphnia pulex* (De Geer). Продукция зоопланктона достигает 950 000 мг/м<sup>3</sup>·год.

Элементный состав (CHNOS) органического вещества и макросостав минеральной части органо-минеральных ДО представлен в табл. 2. Состав ДО отличается концентрациями Si, Ca от озера к озеру, по которым и определяется класс осадка. Содержания остальных макроэлементов меняются в узком диапазоне, при этом различия по содержанию элементов между органо-минеральными ДО, относящимися к разным типам и классам, сопоставимы с аналогичными внутри одного класса.

Методом атомной абсорбции исследовано содержание микроэлементов в образцах различных органо-минеральных ДО (табл. 3). Сравнение концентраций микроэлементов в ДО разного класса показывает, что они в основном сопоставимы, а случаи обеднения микроэлементами (оз. Качкульня, Барчин) связаны с эффектом разубоживания осадка органическим веществом или карбонатами.

Исследования с использованием рентгеноструктурного анализа и СЭМ выявило, что состав терригенной фракции органо-минеральных ДО всех озер сходен. Эта фракция представлена слабоокатанными или остроугольными зернами, агрегатами зерен минералов: кварц, полевые шпаты (альбит, олигоклаз, андезин, микроклин), слюды (мусковит, биотит, иллиты), хлорит. Аутигенная фракция органо-минеральных ДО сформирована преимущественно из минералов: пирит, кальцит разной степени магнезиальности, аморфный кремнезем (который далее кристаллизуется в кварц), арагонит. Однако соотношение содержаний минералов для разных озер различны, и в части ДО озер некоторые из перечисленных минералов не наблюдаются. Дифрактограммы для органо-минеральных ДО всех озер имеют ярко выражен-

Таблица 3. Усредненное содержание микроэлементов (мг/кг) в органо-минеральных отложениях озер

Озеро	Li	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Sr	Cd	Ba	Hg	Pb	Th	
<b>Кальциевый класс ДО</b>															
Барчин	7	14	19	975	3	9	9	36	716	0.13	144	0.03	4	1.0	
Песчаное	7	17	48	615	3	10	14	43	834	0.09	142	0.06	8	4.7	
Мензелинское	4	12	39	275	4	19	10	38	398	0.23	182	0.03	42	1.3	
<b>Кремниевый класс ДО</b>															
Качкульня	24	13	20	319	4	9	13	29	282	0.14	67	0.03	6	0.8	
Камбала	14	48	52	462	8	28	26	64	138	0.24	51	0.03	8	5.4	
Цыбово	13	48	58	532	8	28	23	85	242	0.45	210	0.04	13	6.6	
<b>Смешанный класс ДО</b>															
Бол. Кайлы	9	33	89	455	5	21	31	77	258	0.27	190	0.12	10	6.7	
Ярголь	8	36	33	483	6	18	15	57	116	0.21	53	0.01	5	4.0	

Таблица 4. Групповой состав органического вещества органоминеральных отложений

Озеро	Класс сапропеля	Карбонаты, %	Водорастворимые вещества, %	Битумы, %	Гуминовые вещества, %		Легкогидролизуемые вещества, %	Трудногидролизуемые вещества, %	Негидролизуемый остаток, %
					ФК	ГК			
<b>Макрофитный тип сапропеля</b>									
Ярголь	Смеш.	20.5	4.3	4.1	12.2	9.3	9.6	1.7	39
Мензелинское	»	39.1	5.8	1.7	7.7	5.2	20.1	0.9	20
Качкульня	Кремн.	3.2	7.2	5.3	1.1	2.9	12.5	9	60
<b>Планктономacroфитный тип сапропеля</b>									
Бол. Кайлы	Смеш.	8.9	4.6	4.5	2.2	18.6	14.9	17.4	29
Камбала	Кремн.	15.1	6.7	4.9	13.3	19.1	2.9	0.3	38
Цыбово	»	5.4	6.2	4.6	2.1	20.0	6.3	3.9	39
Барчин	Кальц.	44.6	3.5	2.2	7.1	3.1	12.6	0.15	28
Песчаное	»	4.1	8.4	4.3	1.1	2.4	61.2	1.2	17

ное большое гало с максимумом в области  $20^\circ \text{CuK}_\alpha$ . Интенсивность аморфного гало коррелирует с содержанием органического углерода и/или концентрацией диатомовых створок (аморфного кремнезема).

**Групповой состав органического вещества ДО.** Групповой состав органического вещества определен методом последовательной экстракции по адаптированной методике, изложенной в работах [Юдина и др., 1998; Кривонос, 2012; Struss, 2015] (табл. 4). Выделены следующие фракции: 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), который может содержать как высокомолекулярные органические (лигнин), так и неорганические (кварц, полевые шпаты и др.) вещества. Преобладающее содержание фракции КВ, как и следовало ожидать, обнаружено в органоминеральных ДО кальциевого класса (озера Барчин, Песчаное, Мензелинское). Содержание фракций ВВ и БВ для всех органоминеральных ДО невелики и варьируют от 3.5 до 8.4 % и от 1.7 до 5.3 % соответственно. Содержание фульвовых (ФК) и гуминовых (ГК) кислот изменяется в более широких интервалах от 1.1 до 13.3 и от 2.4 до 20.0 % соответственно. Причем для планктономacroфитных органоминеральных ДО количество ГК значительно превышает количество ФК, кроме оз. Барчин. Корреляций содержания фракции ЛГВ (от 2.9 до 14.9 %) для органоминеральных ДО разного типа и класса не наблюдается. Исключением является сапрпель оз. Песчаное, содержащий 61.2 % ЛГВ. Наибольший вклад фракции ТГВ обнаружен для ДО оз. Бол. Кайлы (17.4 %). Фракции ТГВ для остальных органоминеральных ДО озер близки по значениям и находятся в узком диапазоне 0.9–3.9 %. Фракции НГО для органоминеральных ДО разного типа и класса варьируют от 17 до 39 %, за исключением ДО оз. Качкульня (60 %), образованного преимущественно тростником, и близкого по элементному составу к лигнинам [Таран и др., 2018].

Для кремниевого класса органоминеральных ДО характерно присутствие диатомовых створок (аморфного кремнезема) в значительных количествах (оз. Песчаное до 35 % от общей массы ДО) (рис. 4, а, б). Повсеместно встречаются псевдоморфозы  $\text{SiO}_2$  по мортмассе макрофитов (оз. Ярголь до 46 % от общей массы ДО) (см. рис. 4, в). В общей минеральной массе всех озер к обломочному кварцу добавляются халцедоновые глобулы (см. рис. 4, г, д), имеющие различный генезис.

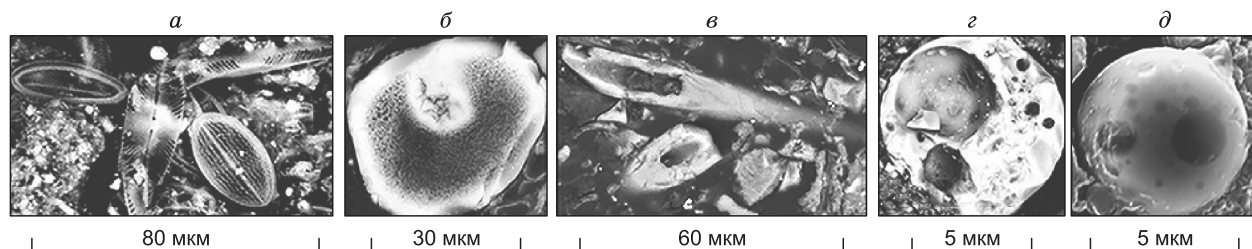
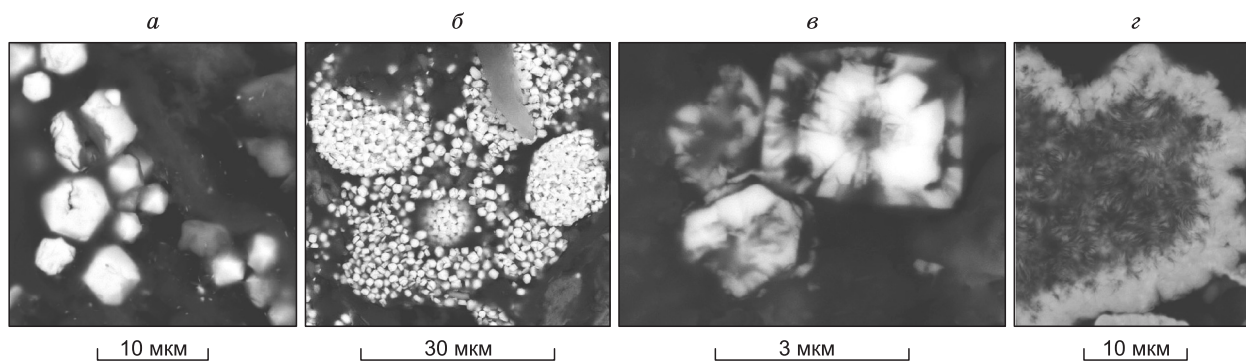


Рис. 4. Электронно-микроскопические снимки (СЭМ):

а, б — створки диатомовых водорослей, состоящие из  $\text{SiO}_2$ ; а — оз. Камбала, б — оз. Песчаное; в — псевдоморфоза  $\text{SiO}_2$  по мортмассе макрофитов (оз. Ярголь); г, д — глобулы из  $\text{SiO}_2$ , имеющие разный генезис: г — оз. Бол. Кайлы, д — оз. Сарбалык.





**Рис. 5. Электронно-микроскопические снимки (СЭМ):**

*a* — отдельные кристаллы пентагон-додекаэдрического габитуса в донных отложениях оз. Барчин, *б* — фрамбоэды пирита и отдельные индивиды округлой формы пирита в ДО оз. Песчаное; *в* — перекристаллизация фрамбоида пирита в метакристалл кубического габитуса, ДО оз. Камбала; *г* — псевдоморфоза пирита по мортмассе макрофитов ДО оз. Песчаное.

Вторым по распространенности среди аутигенных минералов ДО всех озер, но не по количественному содержанию является пирит (рис. 5). 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 (см. рис. 5, *a*), 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 (см. рис. 5, *б*), далее октаэдрическую или кубическую (*в*, *г*), размером до 2 мкм. Состав пирита обычно отвечает его формуле, иногда в виде примеси (<1 %) присутствует Mn, в фрамбоидах начальной стадии образования присутствует вода до 3 %. Наличие пирита и его количество в донных отложениях не зависят от общей минерализации воды, ее ионного состава и генезиса сапропеля.

В органоминеральных ДО *кальциевого класса* наиболее распространены формирования агрегатов псевдоморфозов по растительному детриту кальцитового или низко-Mg кальцитового состава (оз. Барчин, Мал. Мензелинское), зонально-концентрические образования низко-Mg кальцита (оз. Песчаное, Барчин), а также многочисленные обломки арагонитовых раковин. Отметим, что обломки раковин арагонитового состава присутствуют в разных количествах в ДО всех исследуемых озер.

Для органоминеральных ДО *смешанного класса* характерно образование псевдоморфозов аморфного кремнезема по телорезу (оз. Ярголь) и псевдоморфозов низко-Mg кальцита по мортмассе макрофитов (тростник), являющихся одним из доминантов прибрежно-водных растительных сообществ исследованной группы озер (оз. Бол. Кайлы).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изменения ионного состава и значений общей минерализации озерных вод юга Западной Сибири с севера на юг (от зоны южной тайги к степной ландшафтной зоне) в целом соответствуют общеизвестной широтной зональности [Перельман, 1982]. Однако на территории Барабинской низменности расположено большое количество малых озер, состав воды которых является гидрокарбонатно-натриевым и существенно отклоняется от закономерностей широтной зональности, поскольку обусловлен процессами взаимодействия воды с почвами и породами водосборных территорий.

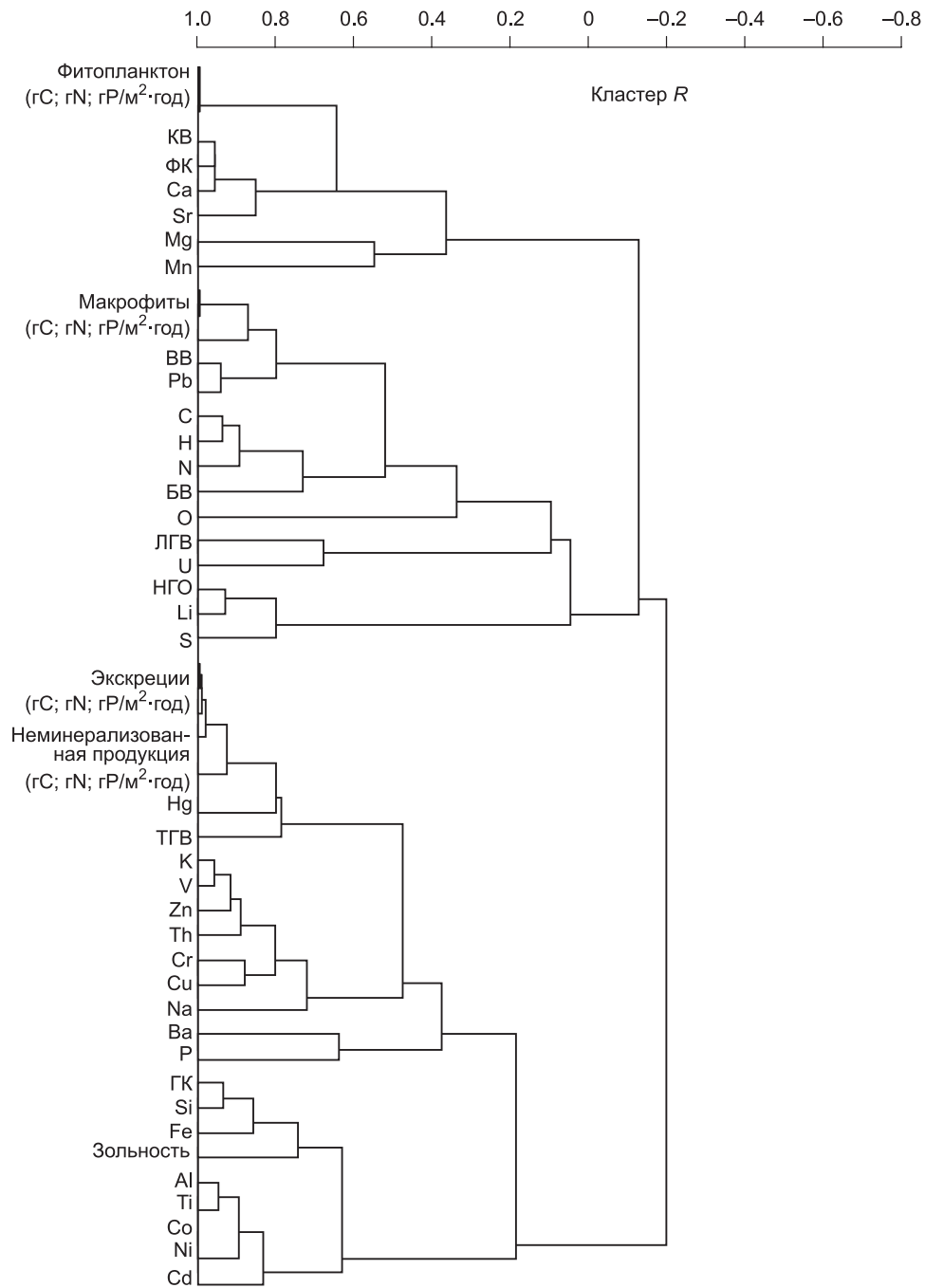
Ситуация осложняется вкладом биогенных процессов в формирование как состава вод, так и ДО. Как показано в предыдущем разделе, явных корреляций между группами ОВ в зависимости от класса и количества органического вещества не выявлено. Однако органоминеральные ДО, отличающиеся по типу биологического вклада в их формирование, имеют различия в элементном (CHNSO) и групповом составе органического вещества. Донные отложения всех исследуемых озер, в которых суммарное содержание ОВ изменяется от 87 % (оз. Качкульня) до 44 % (оз. Камбала), классифицированы по типу биологического вклада в их формирование. Изучение зависимости соотношения Н/С от О/С, величины первичной продукции макрофитов, фито- и зоопланктона, осаждающейся озерной взвеси (по седиментационным ловушкам) показало, что органоминеральные ДО озер Качкульня, Ярголь, Мал. Мензелинское образованы в основном макрофитами и по элементному составу близки к лигнинам. Органоминеральные ДО озер Барчин и Песчаное имеют преимущественно планктонное происхождение с преобладанием

фитопланктона, и по компонентному составу занимают промежуточное положение между пептидами и лигнинами.

Различия в химическом составе биохемойной составляющей фракции осадков озер с различными классами связаны с процессами современного аутигенного минералообразования, протекающими при активном участии микроорганизмов. В общей минеральной массе всех озер к обломочному кварцу и силикатам добавляется халцедон, образующийся за счет аморфного кремнезема створок диатомовых водорослей, фитоморфоз по макрофитам. Минералы, формирующиеся при жизни водорослей, могут образовывать тонкие пленки по первичному каркасу водорослей, состоящие из тонкозернистых выделений кальцита, низко-Mg кальцита, иногда арагонита, пирита. Но чаще всего пирит представлен фрамбоидами и/или отдельными кристаллами разного габитуса. Известно, что в результате микробиологических процессов разложения органического вещества происходит восстановление  $Fe^{3+}$ . В условиях, характерных для границы раздела сред, анаэробные микроорганизмы способны окислять  $H_2S$ , выделяя при этом серу [Потехина, 2005]. Сера, полученная при окислении  $H_2S$ , является коллоидной; процессы коагуляции коллоидов приводят к формированию характерного фрамбоидального облика пирита, независимо от того, происходит ли дальнейшее образование пирита за счет микробиологического процесса или хемогенного [Белогуб, 2009]. Образование карбонатов в пресных водах хемогенным путем невозможно, но фотосинтезирующие организмы, извлекая растворенную в воде углекислоту, изменяя рН среды в щелочную сторону, вызывают выпадение в осадок растворенных карбонатов. В результате жизнедеятельности бактерий и грибов, обитающих в придонной части и в поверхностных слоях ДО в огромных количествах при анаэробной деструкции исходного органического вещества илов выделяются газы —  $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $NH_3$  и др. Это способствует химическому осаждению карбонатов кальцит-доломитового ряда в озерах с содовым составом вод. Во всех озерах с другим типом вод накапливаются арагонит и кальцит.

Для уточнения вклада различных организмов и их метаболизма в формирование минерального вещества ДО проведен кластерный анализ геохимических, биологических аналитических данных: зольность, содержание макро- и микроэлементов органоминеральных ДО, элементный и групповой состав органического вещества, продукция (органический углерод ( $C_{org}$ , гС/м<sup>2</sup>·год), азот ( $N_{org}$ , гN/м<sup>2</sup>·год) и фосфор (P, гP/м<sup>2</sup>·год)) фитопланктона, макрофитов и неминерализованная продукция и экскреция зоопланктона. Использование кластерного анализа позволяет из всего рассматриваемого множества признаков на основании корреляционных параметров выделять группы объектов и оценить коррелированность не только отдельных пар объектов, а также целых групп [Дэвис, 1990]. Кластер-анализ Q-типа разбил выборку проб органоминеральных ДО на три группы, которые в основном соответствуют биогенетическому типу формирования ДО. В результате кластерного анализа R-типа, который выявляет корреляционные связи между заданными параметрами, выделились три основные группы, имеющие положительные внутренние связи с отрицательным коэффициентом корреляции между группами (рис. 6). В процессе исследования группового состава органического вещества органоминеральных ДО методом последовательной экстракции образцы ДО обрабатывались 0.05N раствором соляной кислоты для удаления карбоната кальция. Полученная таким образом фракция KB, как и следовало ожидать, имеет сильную положительную корреляцию с Ca и элементами карбонатофилами (Sr, Mg, Mn). А вот значимая корреляция группы KB с продукцией фитопланктона и фульвовыми кислотами (основной вклад в образование которых вносят микроорганизмы) указывает на биохемойный, биогенный генезис карбонатов. Макрофиты являются важнейшими первичными продуцентами органического вещества в водоемах. Этим объясняется высокая корреляция продукции макрофитов с содержанием C, H, N и O в органоминеральных ДО. Основные компоненты биомассы макрофитов — это полисахариды (целлюлоза, гемицеллюлозы) и лигнин. Поэтому для макрофитогенных органоминеральных ДО характерны высокие концентрации ЛГВ (продуктов гидролиза гемицеллюлоз) и НГВ (в основном лигнина). В целом количество НГВ во всех образцах значительно отличается, и в планктоногенном осадке данный остаток состоит в основном из минерального вещества. Обособление НГВ указывает на комбинированное действие нескольких факторов. Если связь U с ЛГВ можно объяснить известным фактом сорбции урана органическим веществом, то высокая положительная корреляция НГВ с S и Li требует дальнейшего исследования. Относительное содержание БВ в среднем для озер находится в пределах от 2.5 до 5.3 %. Согласно литературным данным, это свидетельствует о сингенетичной природе битумов [Иванова и др., 2014]. ТГВ в существенном количестве содержится только в макрофитогенных ДО. Основной составляющей ТГВ является целлюлоза, на что указывает высокая положительная корреляция между ТГВ и элементным составом биомассы неминерализованной продукции. Отметим, что неминерализованная продукция и экскреция зоопланктона также оказались тесно связанными с концентрацией ряда металлов (Hg, Cu, Zn и др.), избирательное накопление которых именно зоопланктоном отмечено нами ранее [Polukhina et al., 1998; Ermolaeva et al., 2000]. Кроме того, ранее наглядно продемонстрирована корреляция количественных характеристик зоопланктона с соединениями фосфора, поскольку именно фильтра-

торы и детритофаги (группы Cladocera и Diaptomidae) определяют основной поток фосфора в донные отложения, «консервируя» его в своих пеллетах [Страховенко и др., 2014]. Количество ГК в ДО озер колеблется в очень широких пределах и значительно превышает содержание всех других компонентов. Тесная положительная связь ГК с Si, Fe, а также с зольностью указывает на полигенный источник кремния и железа. С одной стороны, это минералы терригенной фракции (слюды, кварц и др.), с другой



**Рис. 6. Дендрограмма кластер-анализа R-типа,**

где использованы аналитические данные по зольности (соотношения органического и минерального вещества в донных отложениях), содержаниям макро- и микроэлементов ДО (Si, Ca, Na, K, Al, Mg, Fe, Ti, P, Mn, Sr, Ba, Pb, Cd, Li, V, Cu, Zn, Co, Ni, Cr, Hg, U, Th); элементного (CNHOS) и группового состава органического вещества (кальцитов, растворимых в холодной разбавленной HCl (KB), веществ, растворимых в воде при кипячении (BB), битумов, экстрагируемых спирт-бензольной смесью (BB), 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 негидролизуемый остаток (НГО); продукции (органический углерод (C<sub>орг</sub>, гС/м<sup>2</sup>·год), азот (N<sub>орг</sub>, гN/м<sup>2</sup>·год) и фосфор (P, гP/м<sup>2</sup>·год)) фитопланктона, макрофитов и неминерализованной продукции и экскреции зоопланктона.

стороны, по данным авторов [Орлов, 1993; Vermeer, Koopal, 1998; Mayer, 1994a], в природе ГК встречаются как в растворенном виде, так и в иммобилизованном на минеральных поверхностях (оксидах и гидроксидах железа, кремний и алюминийсодержащих минералах), выступая в качестве природного модификатора, т. е. комплексы ГК с минеральными частицами образуют органоминеральный пул взвешенного вещества в водных экосистемах. По данным [Mayer, 1994b], максимальная адсорбция ГВ составляет десятки и сотни граммов на килограмм минерала. Например, в океанических ДО содержание природного органического вещества составляет 1 мг  $C_{org}/m^2$ . Корреляция Al, Ti, Cd, Ni, Co с зольностью, указывает на то, что данная подгруппа элементов имеет аллохтонный источник происхождения, т. е. приносимый с водосбора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая данные по распределению изученных элементов в ДО озер с учетом класса и типа осадка, можно утверждать, что основополагающую роль в формировании геохимического и минерального состава ДО малых озер играют сложные природные процессы, определяемые в основном совокупностью азональных факторов: образованием седиментационного материала на водосборе озера в зависимости от рельефа, геологии, почвенного и растительного покрова, а также хозяйственной деятельности человека; формированием аутигенного органического и минерального вещества в результате биологических, биохимических и физико-химических процессов; осаждением сложной смеси аллохтонного и автохтонного вещества на дно озера, протекающим в условиях длительного ледостава (в анаэробных условиях).

Установлено, что органоминеральные ДО различных классов и различающиеся по биогенетическому типу формирования отличаются не только по относительным концентрациям главных элементов (Si, Ca, C, O), но и по содержанию главных групп органического вещества. Выявлено прямое влияние трансформации органического вещества на минеральный состав донных отложений. Содержание остальных элементов меняется в узком диапазоне, при этом различия по содержанию элементов между органоминеральными ДО, относящимися к разным типам и классам, сопоставимы с аналогичными внутри одного класса.

Полученные результаты могут быть полезны при разработке рекомендаций по использованию сапропелевых залежей не только в сельском хозяйстве и животноводстве, но и при рассмотрении их в качестве перспективного сырья для других отраслей народного хозяйства.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН, ИХХТ СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН (№ 0356-2019-0032) и при поддержке грантов РФФИ № 18-45-540002 — p\_a; 17-05-00404a.

## ЛИТЕРАТУРА

**Белогуб Е.В.** Онтогенез гипергенных сульфидов из зон окисления. Онтогенез минералов и ее значение для решения геологических прикладных и научных задач (к 100-летию со дня рождения профессора Д.П. Григорьева) // *Материалы Годичного собрания Рос. Минералогич. об-ва.* СПб., 2009, с. 11—13.

**Билан М.И., Усов А.И.** Полисахариды известковых водорослей и их влияние на процесс кальцификации // *Биоорганическая химия*, 2001, т. 27, № 1, с. 4—20.

**Гашкина Н.А., Моисеенко Т.И., Кремлева Т.А.** Особенности распределения биогенных элементов и органического вещества в малых озерах и лимитирование их трофности на европейской территории России и Западной Сибири // *Вестник Тюмен. гос. ун-та*, 2012, № 12, с. 17—25.

**Гришанцева Е.С., Сафронова Н.С., Кирпичникова Н.В., Федорова Л.П.** Распределение микроэлементов в высшей водной растительности Ивановского водохранилища // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология, Геокриология*, 2010, № 3, с. 223—231.

**Дэвис Дж. С.** Статистический анализ данных в геологии. Кн. 2. М., Недра, 1990, 267 с.

**Иванова Т.А., Павлов Н., Керечанина Е.Д.** Анализ минерализации и трансформации органических веществ, в том числе сапропелей // *Аналитика*, 2014, № 6, с. 62—73.

**Кривонос О.И.** Разработка нового подхода к комплексной переработке сапропелей: Автореф. дис.... к. х. н. Омск, Институт проблем переработки углеводородов СО РАН, 2012, 24 с.

**Курзо Б.В., Гайдукевич О.М., Кляуззе И.В., Зданович П.А.** Особенности формирования вещественного состава сапропеля органического типа в озерах различных регионов Беларуси // *Природопользование*, 2012, вып. 21, с. 183—190.

**Лопотко М.З., Евдокимова Г.А.** Сапропели и продукты на их основе. Минск, Наука и техника, 1986, 191 с.

**Лукина Л.Ф., Смирнова Н.Н.** Физиология высших водных растений. Киев, Наук. думка, 1988, 185 с.

**Орлов Д.С.** Свойства и функции гуминовых веществ. Гуминовые вещества в биосфере. М., Наука, 1993, 298 с.

- Перельман А.И.** Геохимия природных вод. М., Наука, 1982, 134 с.
- Перминова И.В.** Анализ, классификация и прогноз свойств гумусовых кислот: Автореф. дис... д.х.н. М., Изд-во Моск. ун-та, 2000, 35 с.
- Потехина Ж.С.** Редуцирующие бактерии, окисляющие ацетат и водород в донных осадках озер национального парка «Самарская Лука» // Изв. Самар. НЦ РАН, 2005, т. 7, № 1, с. 214—224.
- Романкевич Е.А., Ветров А.А., Пересыпкин В.И.** Органическое вещество Мирового океана // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (4), с. 401—411.
- Савченко Н.В.** Гидрохимическое состояние озер низменных равнин Северной Евразии (на примере Западной Сибири). Новосибирск, 2004, 364 с. Деп. в ВИНТИ, № 1266.
- Страховенко В.Д., Таран О.П., Ермолаева Н.И.** Геохимическая оценка сапропелевых отложений малых озер Обь-Иртышского междуречья // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (10), с. 1466—1477.
- Субетто Д.А.** Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. СПб., Изд-во РГПУ, 2009, 343 с.
- Таран О.П., Болтенков В.В., Ермолаева Н.И., Зарубина Е.Ю., Делий И.В., Романов Р.Е., Страховенко В.Д.** Взаимосвязь химического состава органического вещества озерных систем и генезиса сапропелей // Геохимия, 2018, № 3, с. 61—70.
- Тетельмин В.В., Язев В.А.** Геоэкология углеводородов. Долгопрудный, Издательский Дом «Интеллект», 2009, 304 с.
- Холодов В.Н.** Геохимия осадочного процесса М., ГЕОС, 2006, 608 с.
- Штин С.М.** Озерные сапропели и основы их комплексного освоения. М., Изд-во Московского государственного горного университета, 2005, 373 с.
- Юдина Н.В., Писарева С.И., Панченков В.И., Лоскутова Ю.В.** Параметры оценки биологической активности органического вещества сапропелей // Химия растительного сырья, 1998, № 4, с. 33—38.
- Ярошевский А.А.** Проблемы современной геохимии: конспекты лекций. Изд-во Новосиб. ун-та, 2004, 194 с.
- Ermolaeva N.I., Dvurechenskaya S.Ya., Anoshin G.N.** The study of heavy metal distribution in the Novosibirsk reservoir ecosystem // Geochem. Int., 2000, v. 38, № 5, p. 514—521.
- Helmond N.A.G.M., Hennekam R., Donders T.H., Bunnik F.P.M., de Lange G.Jb., Brinkhuis H., Sangiorgi F.** Marine productivity leads organic matter preservation in sapropel S1: palynological evidence from a core east of the Nile River outflow // Quat. Sci. Rev., 2015, v. 108, p. 130—138.
- Kemp A.E.S., Pearce R.B., Koizumi I., Pike J., Rance S.J.** The role of mat-forming diatoms in the formation of Mediterranean sapropels // Nature, 1999, v. 398, № 6722, p. 57—61.
- Mayer L.M.** Relationships between mineral surfaces and organic carbon concentrations in soils and sediments // Chem. Geol., 1994a, v. 114, p. 347—363.
- Mayer L.M.** Surface area control of organic carbon accumulation in continental shelf sediments // Geochim. Cosmochim. Acta, 1994b, v. 58, p. 1271—1284.
- Polukhina (Yermolaeva) N.I., Dvurechenskaya S.Ya., Sokolovskaya I.P., Baryshev V.B., Anoshin G.N., Vorotnikov B.A.** Some toxic microelements in Novosibirsk reservoir's ecosystem (data XRF SR and AAS techniques) // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1998, v. 405, № 2—3, p. 423—427.
- Reimann C., Caritat P.** Chemical elements in the environment. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1998, 398 p.
- Schoelynck J., Bal K., Backx H., Okruszko T., Meire P., Struyf E.** Silica uptake in aquatic and wetland macrophytes: a strategic choice between silica, lignin and cellulose // New Phytologist, 2010, v. 186, p. 385—391.
- Strus O.Y.** Study of sapropel extracts from Prybych natural deposits // J. Chem. Pharm. Res., 2015, v. 7, № 6, p. 133—137.
- Vermeer A.W.P., Koopal L.K.** Adsorption of humic acids to mineral particles. 2. Polydispersity effects with polyelectrolyte adsorption // Langmuir, 1998, v. 14, p. 4210—4216.
- Yermolaeva N.I., Zarubina E.Y., Romanov R.E., Leonova G.A., Puzanov A.V.** Hydrobiological conditions of sapropel formation in lakes in the south of Western Siberia // Water Resour., 2016, v. 43, № 1, p. 129—140.