

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГОЛОЦЕНОВОГО РАЗРЕЗА САПРОПЕЛЯ ОЗЕРА МИНЗЕЛИНСКОЕ (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

Мальцев Антон Евгеньевич,

аспирант, мл. науч. сотр. Института геологии и минералогии
им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск,
пр. ак. Коптюга, 3. E-mail: maltsev@igm.nsc.ru

Леонова Галина Александровна,

д-р геол.-минерал. наук, ведущ. науч. сотр. Института геологии
и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск,
пр. ак. Коптюга, 3. E-mail: leonova@igm.nsc.ru

Бобров Владислав Андреевич,

канд. геол.-минерал. наук, ведущ. науч. сотр. Института геологии
и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск,
пр. ак. Коптюга, 3. E-mail: bobr@igm.nsc.ru

Кривоногов Сергей Константинович,

д-р геол.-минерал. наук, ведущ. науч. сотр. Института геологии
и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск,
пр. ак. Коптюга, 3. E-mail: s_krivanogov@mail.ru

Сапропель, озерный биогенный осадок, преимущественно состоит из остатков фотосинтезирующих водных растений и является важным хранилищем углерода. Поэтому исследование сапропелевых озер имеет не только теоретическое, но и прикладное (сельское хозяйство, химическая промышленность, медицина) значение.

Цель работы: изучить вещественный и химический состав пятиметрового керна оз. Минзелинское (Новосибирская область), полученного в центральной его части.

Методы исследования: атомно-абсорбционная спектрометрия, масс-спектрометрический метод с индуктивно связанной плазмой, рентгенофлуоресцентный анализ, элементный термический CHNS-анализ, посев и подсчет микроорганизмов, радиоуглеродное датирование, силикатный рентгенофлуоресцентный анализ, рентгеноструктурный (рентгенофазовый) анализ, метод высоко-разрешающей полупроводниковой гамма-спектрометрии с использованием HPGe детектора, потеря при прокаливании (зольность), растворение карбонатов, титриметрический, турбидиметрический и фотометрический методы.

Результаты: Установлено, что в течение последних 6000 лет (голоцен) в озере Минзелинское формировались органо-минеральные отложения, состоящие из двух слоев: макрофитогенный сапропель (0–290 см) и торфянистый сапропель (290–460 см). Озеро развивалось в два этапа: оно образовывалось как заболоченная низина и лишь позднее стало озером. Отношение органики к минеральной части составляет: 40 и 60 % в интервале 0–25 см, 30 и 70 % – в интервале 25–400 см и 20 и 80 % – в интервале 400–460 см, соответственно. За 6000 лет накоплено 13,8 г/см² углерода: в макрофитовом слое – 6,7 г/см², в торфянистом – 7,07 г/см², со средней годовой скоростью накопления углерода 23 мг/см². Неодинаковое обогащение горизонтов осадка химическими элементами отражает изменения типов растительности и проходящих в них биохимических реакций. Несмотря на различия слоев, их химический состав показывает пригодность сапропелей оз. Минзелинское для хозяйственного использования.

Ключевые слова:

Сапропель, макрофиты, торф, микроэлементы, органическое вещество.

Введение

Сапропелевые отложения привлекают внимание исследователей в связи с возможностями их использования в практических целях [1, 2] и из-за теоретического интереса к этим органогенным осадкам, давшим, по мнению ряда ученых, в далеком прошлом материал для образования углеродистых осадочных пород [3, 4].

Сапропели – это современные или субфоссильные, тонкоструктурные, коллоидальные отложения континентальных водоемов [5]. Они в основном состоят из мелкодисперсного органического вещества и небольшого количества слабо разложившихся остатков микроскопических водных

организмов, неорганических компонентов биогенного происхождения и терригенных минеральных примесей. Генетически близки к сапропелям торфа, но сапропели отличаются от торфов тонкой структурой. Существуют также биогенные отложения, переходные между торфами и сапропелями – торфянистые сапропели, характерные для неглубокой зарастающей макрофитами литорали озер и содержащие значительное количество остатков не вполне разложившейся растительности.

Накопление сапропелей является характерной чертой бессточных озер умеренного пояса [6, 7]. Физико-географические условия юга Западной Сибири также благоприятны для сапропелеобразования

ния: плоский слаборасчлененный рельеф, относительно теплый климат, избыток влаги и интенсивный поверхностный сток. Большинство сапропелевых озер юга Западной Сибири небольших размеров, мелководные, слабопроточные или непроточные. В 70–80-е гг. XX в. была проведена геологическая съемка и разведка запасов торфяных и сапропелевых месторождений Западной Сибири [8]. Органическое вещество оценивалось как сельскохозяйственное удобрение по агрохимическим параметрам. Вопросы формирования сапропелевых залежей, их геологической истории и элементный химический состав сапропелей не рассматривались. На сегодняшний день существуют немногочисленные публикации по исследованию сапропелей озер Западной Сибири, посвященные палеоклиматическим проблемам [9, 10], а также геохимии озерных сапропелей [11–13].

Целью данной работы явилось исследование геохимической характеристики пятиметрового керна сапропеля оз. Минзелинское.

Объекты и методы

Озеро Минзелинское расположено на террасе левого берега р. Оби (рис. 1) в северо-восточной части Колыванского района Новосибирской области. Длина озера 12 км, наибольшая ширина 2,2 км, средняя глубина менее 1 м (наибольшая 3,5 м), площадь озера 12,5 км², запасы сапропеля около 8159 тыс. т [8]. Питание озера осуществляется за

счет весенних паводков и атмосферных осадков. Притоков озеро не имеет, но из него вытекает река Крутишка, которая впадает в р. Обь. На водосборной площади распространены серые лесные почвы. Озеро расположено среди кедровых, сосновых, березовых лесов и обширных болот. Тип зарастания водоема смешанный – сочетание сплавин и обширных зарослей. Дно озера покрыто ковром макрофитов (в основном уруть), в прибрежной зоне обильны телорез алоэвидный, гидрилла мутовчатая и водокрас лягушачий, а вдоль берега – тростник, рогоз широколистный, различные виды осок.

В августе 2012 г. в озере пробурена скважина (координаты 55°53' с.ш., 83°23' в.д.) глубиной 5 м вибрационным методом поршневым пробоотборником. КERN диаметром 7,5 см непрерывный и имеет ненарушенную структуру. При отборе керна предварительно описывали и фотографировали, упаковывали в полиэтилен и пластиковые пеналы целиком, и в ненарушенном состоянии транспортировали. В лабораторных условиях выполняли детальное описание керна и послыйный отбор проб с шагом 5 см на радиоуглеродное датирование и различные виды анализов.

В пятисантиметровых интервалах керна были определены веса влажного и высушенного образца и его зольность. Пробу сушили в течение суток при температуре ~80 °С. Озоление проводилось при температуре 450 °С в течение 5 часов. Для определения содержания карбонатов сухую пробу зали-

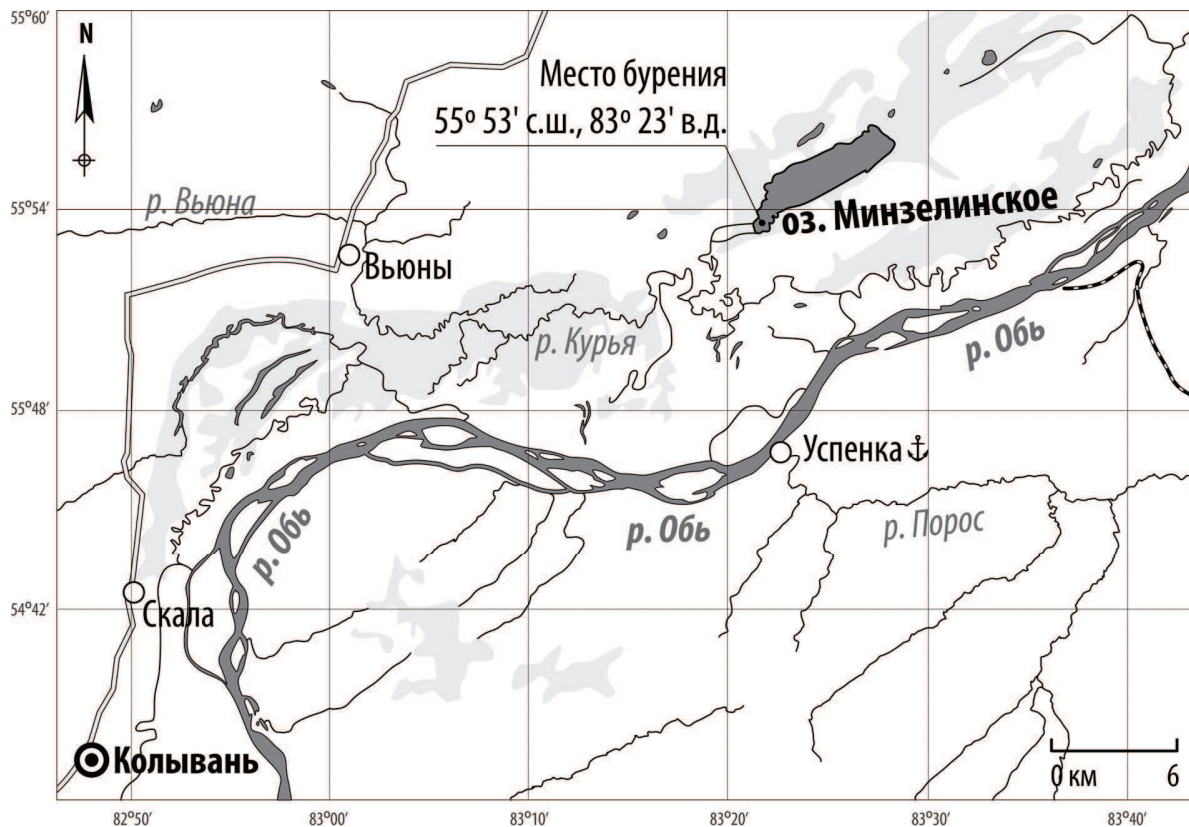


Рис. 1. Карта-схема расположения оз. Минзелинское и координаты точки бурения

вали 10 % HCl, оставляли на сутки, затем проба фильтровалась, и фильтрат высушивался. Далее, для удаления остатков HCl, пробу заливали дистиллированной водой, фильтровали, высушивали и взвешивали. По разности масс пробы до и после заливки кислотой определялось содержание карбонатов в пробе.

Отбор проб озерной воды для общего химического анализа проводили с глубины 1 м в пластиковую посуду объемом 1 л. В пробах на месте производили измерение pH, растворенного кислорода, температуры при помощи pH-анализатора АНИОН 4100.

Исследование макрокомпонентного состава воды выполнено в аккредитованной лаборатории контроля качества природных и сточных вод Федерального государственного учреждения «ВЕРХНЕОБЬРЕГИОНВОДХОЗ» (аналитик Т.М. Булычева).

Определения макро- (Na, Mg, Al, K, Ca, Fe) и микроэлементов (Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, As, Cd, Sb, Hg, Pb) проведено в образцах сухого сапропеля атомно-абсорбционным методом (ААС) в лаборатории геохимии благородных и редких элементов и экогеохимии ИГМ СО РАН (аналитики В.Н. Ильина, Ж.О. Бадмаева, Н.В. Андросова). Элементный анализ органического вещества сапропеля выполнен на автоматическом CHNS-анализаторе в лаборатории микроанализа НИОХ СО РАН (аналитик В.Д. Тихова). Посев и подсчет микроорганизмов проводился под руководством д.б.н., профессора Л.М. Кондратьевой (Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск). Определены основные породообразующих оксидов выполнено рентгено-флуоресцентным анализом в лаборатории рентгеноспектральных методов анализа

ИГМ СО РАН (аналитик Н.Г. Карманова). Минеральный состав сапропеля исследован рентгеноструктурным анализом в лаборатории геологии кайнозоя, палеоклиматологии и минералогических индикаторов климата ИГМ СО РАН (аналитик Л.В. Мирошниченко). Возраст керна сапропеля определен методом радиоуглеродного датирования в радиоуглеродной лаборатории ЦКП СО РАН «Геохронология кайнозоя» (аналитик Л.А. Орлова). Радиоактивность верхних слоев керна сапропеля определена на низкофононом гамма-спектрометре с колодезным коаксиальным детектором HPGe, объемом 200 см³ с чувствительностью определения радионуклидов ²¹⁰Pb, ²²⁶Ra, ²³²Th, ²³⁸U, ¹³⁷Cs, ⁴⁰K на уровне 0,05 Бк (аналитик М.С. Мельгунов [14]).

Результаты исследований и обсуждение

Воды оз. Минзелинское являются гидрокарбонатными кальциевыми, слабощелочными (pH – 8,3), маломинерализованными (0,23 г/л). Концентрации основных анионов и катионов воды составляют: HCO₃⁻ – 158, Cl⁻ – 24,4, SO₄²⁻ – 2,3, Ca²⁺ – 20, Mg²⁺ – 8, Na⁺ – 12, K⁺ – 0,2 мг/л, содержание растворенного O₂ в воде – 4,3 мг/л.

Детальное изучение керна (рис. 2) показало неоднородность вещественного состава его стратиграфических горизонтов, обусловленное различными источниками органического вещества (ОВ). Верхний слой озерных отложений представлен макрофитогенным сапропелем с содержанием ОВ 20–44 %. Ниже залегает разложившийся торфянистый сапропель, содержание ОВ в котором изменяется от 24 до 32 %. Его подстилает слой торфа, переходящий снова в торфянистый сапропель с большим количеством раковин остракод и гастро-

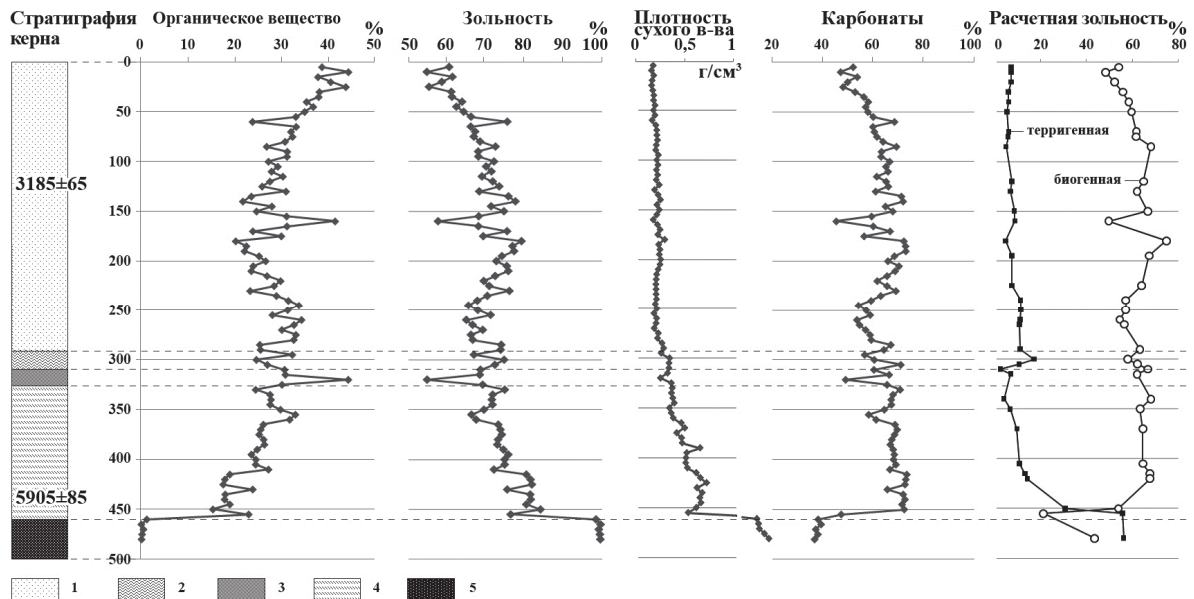


Рис. 2. Стратиграфия и основные компоненты донных отложений оз. Минзелинское: 1 – макрофитогенный сапропель (0–290 см); 2 – торфянистый сапропель (290–310 см); 3 – торф (310–320 см); 4 – торфянистый сапропель (320–460 см); 5 – песок (460–500 см)

под. Содержания ОВ в торфе и торфянистом сапропеле изменяются в интервалах 31–44 и 15–33 %, соответственно. Озерные отложения подстилаются песком.

По данным радиоуглеродного датирования длительность накопления сапропеля оценивается в 6000 лет.

Озерные отложения образовывались в разных условиях (снизу вверх): мелководного водоема типа заболоченного займища, низинного болота, прибрежной части мелкого озера и удаленной от берега части более глубокого озера. Их образование шло с участием разных источников биогенного вещества: болотных и прибрежноводных растений торфообразователей для трех нижних слоев, и водных макрофитов для верхнего слоя. Разные биологические типы сапропеля (макрофитогенного и торфянистого), очевидно, образовались при разных условиях обводненности озерной котловины, что, возможно, отражает изменения климатических условий.

В настоящее время в озере макрофитами продуцируется от 1500 до 1900 г/м² ОВ в год. Основной вклад в первичную продукцию ОВ вносят полупогруженные макрофиты – тростник, рогоз, от 1185 до 1280 г/м² в год. Значительный вклад в образование ОВ в водоеме вносит также гидрилла, хотя ее первичная продукция составляет 122 г/м² в год, площади, занимаемые ее сообществами, составляют 20 % от площади акватории озера. Вклад телореза и водокраса составляет до 512 г/м² ОВ в год [15]. На основании этих данных можно заключить, что ведущую роль в образовании сапропелей играют макрофиты.

Плотность сухого вещества сапропеля постепенно уменьшается снизу вверх, изменяясь от 0,5 до 0,15 г/см³ (рис. 2), что отражает естественное уплотнение осадка в нижних горизонтах. Об уменьшении содержания минеральной компоненты однозначно свидетельствует изменение зольности от 84 до 61 %. Содержание карбонатов высокое по всей толще озерных отложений и изменяется в пределах от 73 до 46 %.

На основе данных по содержанию Al, определенным методом атомной абсорбции, рассчитана терригенная зольность согласно выражению:

$$Z_{\text{тер.}} = (Al_{\text{обр.}} / Al_{\text{вкк}}) \times 100 \%, \quad (1)$$

где $Z_{\text{тер.}}$ – доля терригенного материала в отдельном пятисантиметровом образце керна; $Al_{\text{обр.}}$ – содержание алюминия в этом же образце; $Al_{\text{вкк}}$ – содержание алюминия в верхней континентальной коре [16].

Биогенная зольность рассчитана согласно выражению:

$$Z_{\text{био}} = Z_{\text{обр.}} - Z_{\text{тер.обр.}}, \quad (2)$$

где $Z_{\text{био}}$ – биогенная зольность; $Z_{\text{обр.}}$ – общая зольность; $Z_{\text{тер.обр.}}$ – зольность, полученная из выражения (1).

Результаты расчета приведены на рис. 2 (расчетная зольность).

Значения зольности 55–75 % сопоставимы со значениями карбонатной составляющей 50...65 % по данным рентгеноструктурного анализа. В зольном веществе сапропеля преобладающим минералом является кальцит ($CaCO_3$), на который приходится 80 % зольного вещества, на долю остальных минералов (арагонит, Mg-кальцит, кварц, плагиоклаз, гипс, хлорит) приходится 10–15 %. Рассчитанная согласно выражению (1) терригенная зольность составляет сверху до глубины 250 см 5–7 %, ниже – 11 %, в песчанистых горизонтах – до 60 %. В торфянистом сапропеле в интервале 300–305 см зафиксирован максимум терригенной зольности 17 %, а в торфе в интервале 310–315 см – минимум 2,5 %. Биогенная зольность, вычисленная по выражению (2), составляет 80–90 % общей зольности, что совпадает со значением зольности, соответствующей содержанию кальцита, который в значительном количестве фиксируют макрофиты: гидрилла и рдест (табл. 2).

Таким образом, по содержанию ОВ (среднее ~30 %) и величине зольности (среднее ~70 %) отложения оз. Минзелинское отнесены к органо-минеральным известковистым сапропелям согласно [5, 17].

Распределение основных биогенных элементов (С, Н, N) по разрезу сапропеля однородно. Средние их содержания в макрофитогенном сапропеле (С 39,9±2,3; Н 4,7±0,6 и N 2,7±0,4 %) близки к таковым в торфянистом сапропеле (С 38,5±2,0; Н 4,2±1,6 и N 2,5±1,0 %), что можно объяснить сходством источников формирования ОВ – водная и околородная растительность. Выявлены очень низкие содержания серы по всему разрезу – менее 0,2 % (на пределе обнаружения элементного анализа). Исключение составляет интервал керна 420–425 см, где содержание S составило 0,96 %.

Накопление в 4,6-метровом керне сапропеля, с основанием 1 см² и объемом 460 см³, углерода составило 13,8 г/см²: в макрофитовом слое – 6,7 г/см², в торфянистом – 7,1 г/см². Средняя скорость депонирования углерода за 6000 лет составила 23 мг/см² в год. Например, в 2012 г. первичная продукция углерода макрофитами, по данным [15], составила 88,7 мг/см².

Значения содержаний U по разрезу шестидесятисантиметровой колонки находятся на уровне 0,2 г/т, и лишь в слое 50–55 см его содержания повышаются до 0,37 г/т (табл. 1). Содержания ²²⁶Ra в этом же горизонте относительно повышены по сравнению с вышележащими горизонтами: 11 Бк/кг на фоне 3–4 Бк/кг, и, возможно, это повышение вызвано сдвигом радиоактивного равновесия по отношению ²³⁸U в сторону ²²⁶Ra. Не связанный с ²²⁶Ra в осадке атмосферный ²¹⁰Pb на горизонте 50–55 см фактически распадается полностью. Активность (Бк) подошвы слоев (объемом 192 см³ и сечение 38,4 см²) рассчитана на основе удельных активностей ²¹⁰Pb, ²²⁶Ra Бк/кг в отдельных пятисантиметровых слоях. Эти значения являются опорными для подсчета возраста слоев t(x) по выражению:

$$t(x) = -\lambda^{-1} \times \ln(\Sigma A_h / \Sigma A_i),$$

где λ – постоянная радиоактивного распада ^{210}Pb , равная $\ln 2/T$; T – период полураспада ^{210}Pb (22,6 года); ΣA_h – интегральная активность неравновесного (атмосферного) ^{210}Pb в разрезе, подстилающем датруемый слой; ΣA_i – интегральная активность неравновесного ^{210}Pb , суммированная по всей колонке (активность подошвы нулевого слоя) [14].

Возраст горизонта 45–50 см на основе расчетов соответствует календарному периоду 1862–1907 лет. В распределении ^{137}Cs по слоям колонки керна не образуется повышения в слоях, сформировавшихся в период ядерных испытаний, т. е. в слое 25–30 см (1954–1965 гг.). Около 50 % сохранившегося ^{137}Cs находится в верхнем слое 0–5 см, сформировавшемся за последние 13 лет. Трансформация ^{137}Cs в поверхностные горизонты органогенного осадка, сформировавшегося из макрофитов, является закономерным явлением для ^{137}Cs , который участвует в фотосинтезе, как и К, Mg, Rb и др. Скорость накопления сапропеля в XX в. составила 4 мм в год, а в предыдущие годы (5600 лет) – 0,7 мм в год.

На рис. 3 представлено распределение в слоях сапропеля и подстилающих песках трех групп элементов: 1) Al, K, Na, составляющих терригенную (обломочную) часть донного осадка; 2) Ca, Mg, Sr, входящих в состав карбонатов; 3) Zn, Cu, Hg, связанных с антропогенным воздействием.

Содержание элементов первой группы стабильно в сапропеле и существенно увеличивается в песках. Al составляет 0,5–0,8 % в макрофитогенном сапропеле, 1,3 % в торфянистом сапропеле и 4,3 % в песчанистом горизонте. Содержание К и Na в сапропеле 0,1–0,3 и 0,08–0,15 %, а в песке 1,5 и 1,6 % соответственно.

Во второй группе содержания Ca в сапропеле меняются от 15 до 24 % с экстремальным значением 38 % в горизонте 70–75 см. Содержания Mg и Sr плавно увеличиваются книзу от 0,45 до 1,2 % и от 0,07 до 0,14 %, соответственно. В песке содержания Ca, Mg и Sr снижаются до значений 1,6, 0,36 и 0,02 % соответственно.

Третья группа элементов показывает большую неоднородность в их распределении. Наиболее высокие содержания Zn (824 мг/кг) и Cu (204 мг/кг) отмечаются в приповерхностном слое сапропеля (0–10 см), уменьшаясь до 300 и 58 мг/кг на глубине 90 см. Ниже содержания этих элементов на порядок меньше, чем в слое 0–10 см. Исключение составляют интервалы 180–185 см для Zn с пиком в 354 мг/кг и 180–200 см для Cu, где наблюдается увеличение до 54,8–79 мг/кг. Концентрации Hg в интервале 0–125 см составляют 0,056–0,019 мг/кг, ниже концентрации падают до 0,001–0,005 мг/кг, а с уровня 260 см опять увеличиваются.

Принимая Al в качестве опорного элемента, содержание которого в верхней континентальной коре составляет 7,74 %, а Ca – 2,94 % по [16], оценен процентный вклад терригенного Ca в сапропель оз. Минзелинское согласно выражению:

$$Ca_{\text{терр.}} = (Al_{\text{образец}} / Al_{\text{з.к.}}) \cdot Ca_{\text{з.к.}}$$

где $Al_{\text{образец}}$ – содержание Al в отдельном горизонте сапропеля; $Al_{\text{з.к.}}$ – содержание Al в верхней континентальной коре; $Ca_{\text{з.к.}}$ – содержание Ca в верхней континентальной коре [16].

Средний вклад терригенного Ca в сапропеле составляет 1,2 % (рис. 3). Максимальный вклад 2,82 % обнаружен в торфянистом сапропеле (300–305 см), минимальный 0,35 % – в торфе (310–315 см). Низкий вклад терригенного кальция свидетельствует о том, что основная его часть переходила в сапропель из воды или освобождалась при разложении кальций-фиксирующих сапропелеобразующих растений. Таким образом, основная минеральная масса сапропеля представлена биогенным карбонатом. Усредненный состав всего слоя озерных отложений: 30 % – органика, 60 % – биогенный карбонат, 10 % – терригенная компонента.

Проведено сравнение усредненного элементного состава, макрофитов (гидриллы, телорез, водокрас) макрофитогенного сапропеля (две выборки: интервал 0–90 и 90–290 см), торфянистого сапропеля (290–460 см) и песчаного осадка (460–480 см) с

Таблица 1. Радиоактивность верхних (0–60 см) слоев сухого вещества сапропеля оз. Минзелинское ($^{210}\text{Pb}_{\text{атм.}}$ – атмосферный свинец)

Горизонт, см	Радиоактивность						Активность			Коммул. нак. $^{210}\text{Pb}_{\text{атм.}}$, Бк	Календарный возраст	Накопление, г/см ² год
	U, ppm	Th, ppm	K ₂ O, %	²²⁶ Ra, Бк/кг	²¹⁰ Pb, Бк/кг	¹³⁷ Cs, Бк/кг	²¹⁰ Pb, Бк	²²⁶ Ra, Бк	²¹⁰ Pb _{атм.} , Бк			
0–5	0,20	3,14	0,26	3,3	168,9	57,6	4,9	0,09	4,81	4,81	2013–2000	0,058
5–10	0,13	2,84	0,08	3,0	89,5	20,3	2,22	0,08	2,15	6,96	2000–1993	0,093
10–15	0,21	2,36	0,20	2,8	78,5	19,8	2,17	0,09	2,08	9,04	1993–1983	0,076
15–20	0,25	1,78	0,19	2,8	54,1	19,2	1,46	0,08	1,38	10,42	1983–1975	0,088
20–25	0,25	1,50	0,19	3,0	45,0	16,0	1,30	0,09	1,21	11,63	1975–1965	0,063
25–30	0,24	1,25	0,18	4,1	39,2	13,8	1,13	0,12	1,01	12,64	1965–1954	0,069
30–35	0,22	1,45	0,17	3,7	31,0	10,0	0,90	0,09	0,81	13,45	1954–1940	0,058
35–40	0,20	1,69	0,15	3,4	22,9	7,6	0,66	0,09	0,57	14,02	1940–1926	0,076
40–45	0,21	1,60	0,17	4,0	20,4	6,0	0,60	0,12	0,48	14,50	1926–1907	0,045
45–50	0,22	1,69	0,17	4,7	19,8	4,5	0,58	0,15	0,44	14,93	1907–1862	0,017
50–55	0,37	1,54	0,21	11,0	16,4	5,8	0,50	0,35	0,15	15,08	–	–
55–60	0,23	2,91	0,09	6,7	6,0	<2	0,16	0,19	–0,03	15,05	–	–

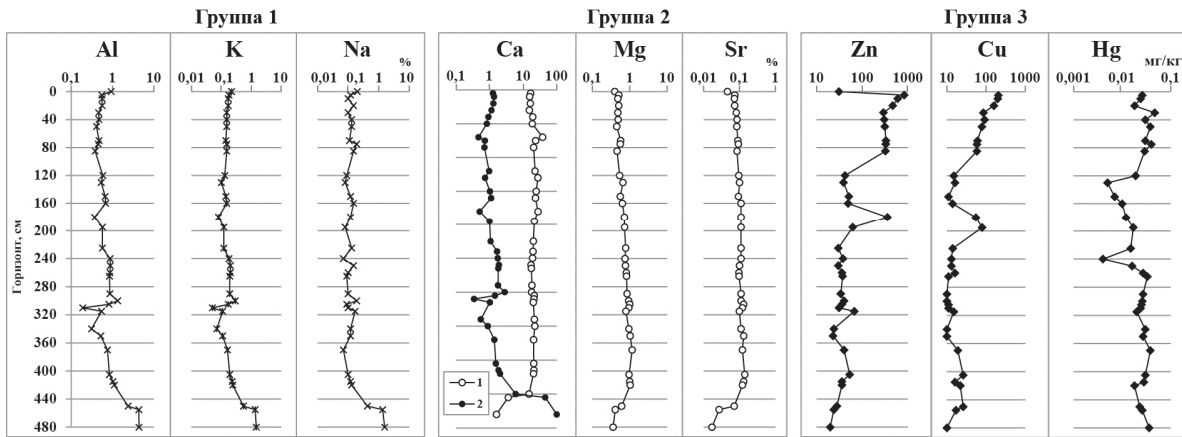


Рис. 3. Изменения концентраций основных элементов в сапреле оз. Минзелинское по группам 1–3 (объяснения в тексте). Для Ca показаны биогенная (1) и терригенная (2) концентрации

кларковыми концентрациями элементов в верхней континентальной коре [16] с предварительным нормированием по алюминию, как наименее подвижному элементу в системе «озерная вода – осадок», согласно выражению [18]:

$$EF = (x_i / x_{Al})_{\text{образец}} / (x_i / x_{Al})_{\text{вкк}}$$

где $x_{i\text{образец}}$ – содержание i -го химического элемента в объекте исследования; x_{Al} – содержание алюминия в объекте исследования; $x_{i\text{вкк}}$ – содержание химического элемента в верхней континентальной коре; $x_{Al\text{вкк}}$ – содержание алюминия в верхней континентальной коре.

Органогенные слои существенно обогащены микроэлементами по сравнению с песками (рис. 4), коэффициенты обогащения (EF) которых близки к единице, за исключением Na, Ca и Sb. Обогащенность сурьмой органогенных слоев на 1 порядок выше, чем песков. Обогащение медью и цинком слоев 2 и 3 примерно одинаково и находится на уровне EF 7–65. Верхний слой 0–95 см имеет очень высокие EF для меди (35), цинка (65)

и кадмия (9,5). Для слоев 1–3 отмечаются высокие коэффициенты обогащения кальцием (EF 174–203). Слой торфянистого сапреля (3) имеет более высокие EF для магния, марганца, мышьяка, стронция по сравнению с макрофитогенным сапрелем (1, 2). Обогащенность медью и цинком верхних горизонтов слоя 1, по всей вероятности, связано с загрязненностью атмосферы, которая резко возросла в последние два столетия, что иллюстрируется графиками содержания меди и цинка в верхних слоях сапреля (рис. 3). В интервале 0–10 см содержание Zn 824 и Cu 204 мг/кг. Геохимическая специфика органогенных сапрелей выражается в аккумуляции подвижных элементов – Mg, Fe, V, Co, Ni, Cu, Zn. Обогащенность мышьяком озерных отложений, возрастающая сверху вниз от EF 17 до EF 38, мы связываем с поступлением мышьяка в озерную воду из окружающих болот. Также обогащение сапреля элементами может быть связано с растениями сапрелеобразователями, которые, отмирая, обра-

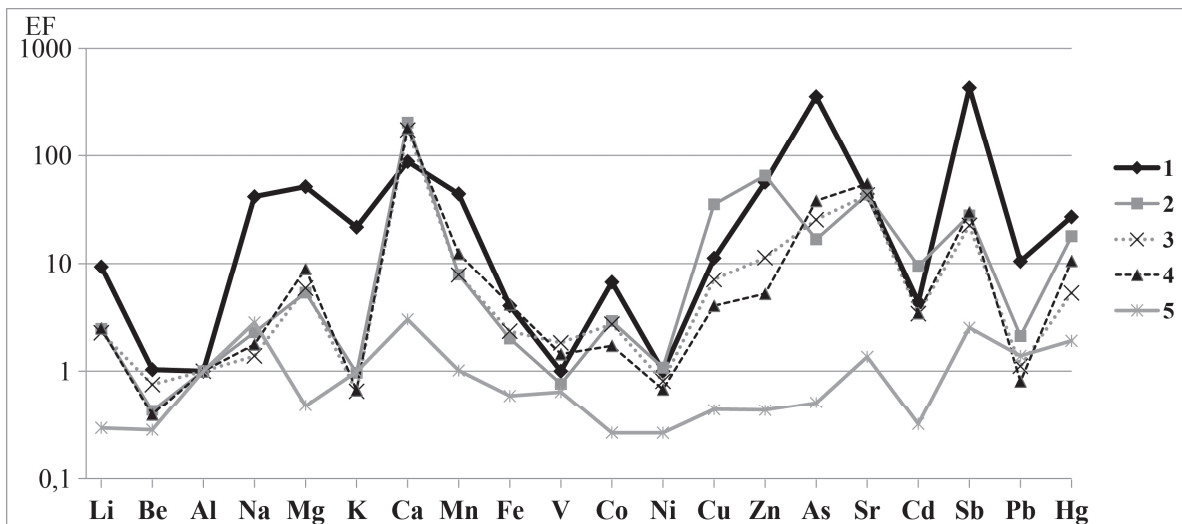


Рис. 4. Коэффициенты обогащения (EF) химическими элементами: 1 – макрофитов (гидриллы, телорез, водокрас); 2 (0–90 см) и 3 (90–290 см) – макрофитогенного; 4 – торфянистого сапреля (290–460 см); 5 – песчаного горизонта (460–480 см) оз. Минзелинское. Нормирование проведено по Al и кларкам верхней континентальной коры [16]

зуют органогенный осадок, обогащая его элементами, накопленными при жизни.

Аккумулятивные растения Na и K (EF ~41–22) не обогащают осадок. Обогащенность осадка такими элементами, как Cu, Zn, Ca, выдерживается на одном уровне с макрофитами. Более высокие значения коэффициентов обогащения As, Sb и Hg у макрофитов отражают загрязненность атмосферы (близость крупного поселка Колывань и Обского пароходства).

В химическом составе сапропеля (табл. 2) преобладает оксид кальция (CaO). Его содержание варьирует от 18 до 40 % в органогенной части осадка (интервал 0–455 см). Содержание оксида кремния (терригенная компонента) в органогенной части значительно ниже, от 4 до 11,5 %, и увеличивается с глубиной. Стоит отметить увеличение оксида железа в интервале керна 420–450 см до 4 %. В этом интервале по результатам рентгенофазового анализа отмечается наличие пирита.

Таблица 2. Породообразующие оксиды в отложениях и растениях оз. Минзелинское (все данные приведены в % сухой массы, для растений – в % в золе)

Горизонт, см	ППП	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
Растения											
Гидрилла	32,3	7,5	1,2	3,8	3,0	32,2	6,1	4,7	3,4	1,3	6,1
Рдест	37,3	3,3	0,19	0,58	11,6	37,4	1,9	0,8	3,7	1,8	17,6
Телорез	24,1	4,9	0,27	0,44	16,2	17,1	10,2	18,6	2,9	1,6	18,6
Осадок											
0–2	67,9	9,1	1,7	1,2	0,7	17,9	0,2	0,3	0,3	0,3	5,4
15–20	63,5	5,1	1,0	1,1	0,9	27,3	0,2	0,2	0,2	0,3	5,1
55–60	60,1	3,9	0,8	0,8	1,0	32,4	0,2	0,1	0,3	0,3	4,6
80–85	58,5	3,3	0,7	0,8	1,1	34,9	0,2	0,1	0,2	0,3	4,4
135–140	53,1	3,6	0,8	1,1	1,2	39,6	0,1	0,1	0,2	0,2	4,4
155–160	61,7	5,3	1,2	1,4	0,9	28,2	0,2	0,2	0,2	0,3	4,3
215–220	56,2	4,6	1,1	1,5	1,5	34,1	0,2	0,1	0,2	0,3	4,3
255–260	56,3	8,7	1,0	1,8	1,5	28,2	0,3	0,3	0,2	0,4	4,9
290–295	54,6	7,5	1,6	1,7	1,7	31,4	0,3	0,2	0,2	0,3	4,9
300–305	50,6	11,6	2,3	2,0	1,8	29,4	0,4	0,3	0,3	0,3	5,0
305–310	55,4	5,7	1,2	1,5	1,9	32,7	0,3	0,2	0,2	0,4	4,8
315–320	63,6	3,7	0,9	1,8	1,6	27,1	0,2	0,1	0,2	0,5	4,1
350–355	59,3	3,6	0,9	1,8	2,1	31,0	0,2	0,1	0,2	0,6	4,1
415–420	43,8	7,5	1,6	4,0	1,9	33,6	0,4	0,2	0,2	5,7	4,6
450–455	35,0	25,7	3,6	3,6	1,2	23,4	0,8	0,7	0,2	5,1	7,1
455–460	9,2	67,8	7,2	2,4	0,9	7,4	1,7	1,6	0,1	1,4	9,4
475–480	1,7	82,1	7,6	1,9	0,6	2,3	1,9	1,9	0,1	0,4	10,8

Содержание SiO₂ между отдельными пятисантиметровыми слоями меняется в 3 раза (табл. 2). Отношение SiO₂ к Al₂O₃ выдерживается на уровне 4,6±0,3, что близко к отношению этих оксидов в верхней части земной коры: SiO₂ – 65 %, Al₂O₃ – 15,1 %. На основании этого совпадения можно сделать вывод об источнике терригенного материала в сапропеле. Это эоловая транспортировка, происшедшая равномерно в течение всех 6000 лет формирования осадка. Натрий и калий поступали в озеро только из терригенного источника (табл. 3). Щелочноземельные кальций и магний, а также марганец и железо, поступали не только из

терригенного вещества, но и имели иной путь поступления в осадок: из воды через ассимиляцию водными растениями и освобождение при их разложении. Сера и фосфор имеют автохтонное происхождение – они накапливались при жизни растениями сапропелеобразователями, и при их отмирании поступали в осадок. Очень низка терригенная доля для CaO (около 1 %), что свидетельствует об автохтонной природе CaO [17].

Таблица 3. Биогенный и терригенный вклады оксидов в осадок (собственно сапропель, 0–420 см) оз. Минзелинское (%)

Среднее значение вкладов	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Σ
Суммарный	6,0	1,3	1,6	1,4	30,6	0,2	0,2	0,2	0,7	42,2
Терригенный	5,4	1,3	0,4	0,2	0,3	0,3	0,3	0,01	0,02	8
Биогенный	0,6	0	1,2	1,3	30,2	0	0	0,2	0,7	34,2
Отношение вкладов	0,1	0	3,4	6,7	88,7	0	0	16,7	36,3	4,3

Принимая Al₂O₃ в качестве основного окисла терригенного материала и используя соотношения в нем кальция и алюминия, сходные для верхней континентальной коры Al – 7,74, Ca – 2,94 % [16], получаем величину терригенного вклада CaO в сапропеле на уровне 0,21–0,65 %.

Минеральный состав сапропеля оз. Минзелинское по данным рентгенофазового анализа из отдельных интервалов керна показан на рис. 5. На рентгенограммах в интервале 55–60 см, как и во всем макрофитогенном сапропеле (0–290 см), хорошо выражена рентгеноаморфная фаза, основную долю которой составляет органическое вещество. Помимо рентгеноаморфного вещества хорошо диагностируются пики, соответствующие кальциту. Кварца и плагиоклаза крайне мало. Сходный минеральный состав наблюдается в торфянистом сапропеле (415–420 см). В нем много кальцита, в меньшей степени Mg-кальцита. Мало гипса, арагонита кварца, пирита. В песчаном слое (475–480 см) содержится много кварца, содержание плагиоклаза и калиевого полевого шпата (КПШ) среднее, хлорита и кальцита мало.

Кальций в сапропеле присутствует в виде кальцита, реже арагонита, и составляет основную массу (до 90 %) зольного вещества, полученного при температуре 450 °С, не более 10 % от которого составляет терригенная компонента (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, Na₂O, K₂O, P₂O₅, SO₃). Присутствие арагонита в некоторых горизонтах керна связано с наличием раковин гастропод, которые наблюдались в этих горизонтах при препарировании керна. Наличие пирита в нижних горизонтах керна указывает на деятельность сульфат-редуцирующих бактерий [19].

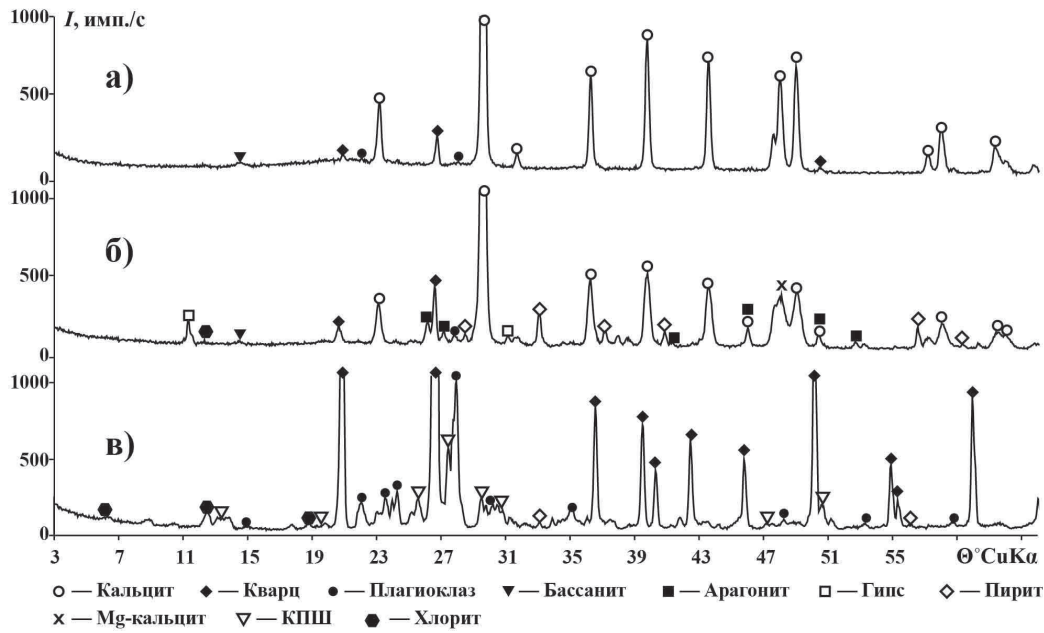


Рис. 5. Рентгенограммы для разных слоев отложений оз. Минзелинское: а) макрофитогенный сапропель (55–60 см); б) торфянистый сапропель (415–420 см); в) песчаный горизонт (475–480 см)

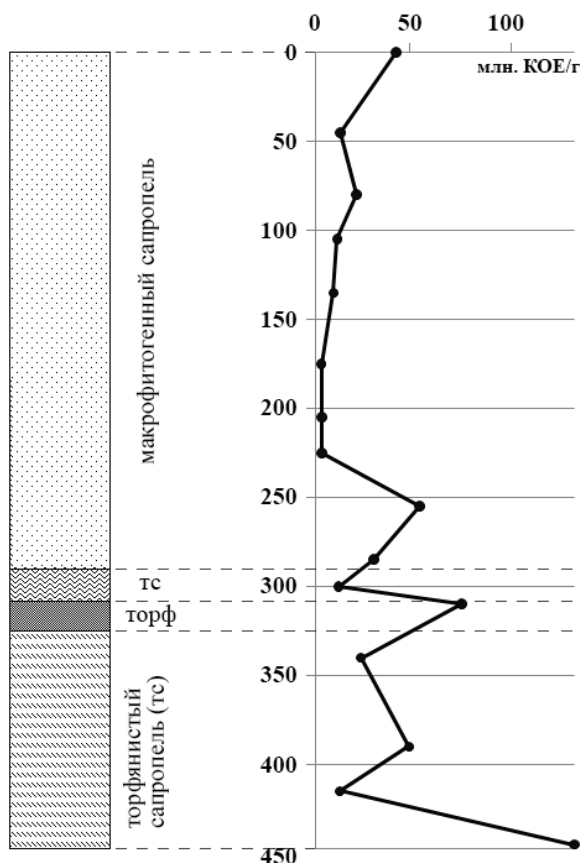


Рис. 6. Распределение и общая численность микроорганизмов в сапропеле оз. Минзелинское

Обычно в работах по геохимии озерных органических отложений редко приводятся данные по микроорганизмам, участвующим в диагенезе. Рассматривая сапропель озера Минзелинское как среду

обитания микроорганизмов, мы выявили различия в распределении группировок микроорганизмов в керне [20] (рис. 6). Максимум общей численности микроорганизмов – 130,1 млн КОЕ/г (величина, исчисляемая в миллионах колониеобразующих единиц на грамм) зафиксирован в торфянистом сапропеле (440–445 см). На этом же участке зольность минерального вещества (преимущественно кальцит) составила 80 %, а органики – 20 %. По всей вероятности, здесь происходит интенсивное разложение органики под влиянием бактерий и высвобождаются микроэлементы. Также пики концентраций микроорганизмов имеются в верхней (0–5 см) и нижней (255–260 см) частях макрофитогенного сапропеля и торфе, 40,6, 52,4 и 73,2 млн КОЕ/г соответственно. Минимум (3,3 млн КОЕ/г) отмечен в слое макрофитогенного сапропеля на участке 175–180 см. Минимумы и максимумы в численности микроорганизмов могут быть обусловлены различием абиотических условий на разных горизонтах, в том числе присутствием необходимых источников углерода и азота [20].

Заключение

Таким образом, оз. Минзелинское развивались в два этапа. Оно образовывалось как заболоченная низина и лишь позднее стало озером. На первом этапе основными источниками ОБ для формирования отложений были водные, прибрежно-водные и болотные макрофиты, давшие довольно грубое по степени разложения органическое вещество. На втором этапе источниками ОБ вещества были водные макрофиты, фито- и зоопланктон самого озера. На начальных стадиях формирования озера накапливался слой торфянистого сапропеля с раковинами гастропод и остракод. Он, по-видимому,

отражает кратковременную фазу мелководного эвтрофного водоема.

По данным распределения ^{210}Pb в керне, скорость накопления сапропеля в XX в. составила 4 мм в год, а в предыдущие годы (5600 лет) – 0,7 мм в год. За весь период (5700 лет) накопление в сапропеле углерода составило 13,8 г/см²: в макрофитовом слое – 6,7 г/см², в торфянистом – 7,1 г/см². Таким образом, скорость депонирования углерода в озере в голоцене (вторая половина) оценивается как 23 мг/см² в год.

Достаточно однородный вещественный состав и соотношение углерода с азотом выдерживается по всему разрезу сапропеля оз. Минзелинское, несмотря на то, что его нижняя часть образовывалась в болотных условиях (торфообразующая растительность), а верхняя – в озерных (водная макрофитная растительность). Заселенность сапропеля бактериальными сообществами, по-видимому, сказалась на содержании объемов органического веще-

ства от 40 до 20 %, при среднем 30 %. При этом минеральная зольность, соответственно, от 60 до 80 %, по составу является известковистой. Процент терригенного вклада в общую зольность относительно низкий от 5–7 % в верхних и до 10–15 % в нижних частях сапропеля.

Высокое содержание карбонатов является важной геохимической характеристикой сапропеля оз. Минзелинское.

Примененный комплекс аналитических методов позволил выявить обогащенность сапропеля химическими элементами по всему разрезу. Высокая степень обогащения микроэлементами позволяет рекомендовать сапропель озера в качестве удобрения для выращивания сельскохозяйственных культур на черноземных и серых лесных почвах Западной Сибири.

Работа выполнена при финансовой поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 125.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штин С.М. Озерные сапропели и их комплексное освоение. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 373 с.
2. Плаксин Г.В., Кривонос О.И. Термохимическая переработка озерных сапропелей: состав и свойства продуктов // Российский химический журнал. – 2007. – Т. LI. – № 4. – С. 140–147.
3. Залесский М.Д. О силурийской водоросли, образующей кукуерсит – горючий сланец // Журнал микробиологии. – 1916. – Т. III. – № 3–4. – С. 444–449.
4. О роли скелетного и бесскелетного биогенного материала в формировании органического вещества баженовской свиты / Ю.Н. Занин, А.Г. Замирайлова, В.Р. Лившиц, В.Г. Эдер // Геология и геофизика. – 2008. – Т. 49. – № 4. – С. 357–366.
5. Кордэ Н.В. Биостратификация и типология русских сапропелей. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 219 с.
6. Особенности формирования вещественного состава сапропеля органического типа в озерах различных регионов Беларуси / Б.В. Курзо, О.М. Гайдукевич, И.В. Кляуззе, П.А. Зданович // Природопользование. – 2012. – Вып. 21. – С. 183–191.
7. Топачевский И.В. Сапропели пресноводных водоемов Украины // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2011. – № 1. – С. 66–72.
8. Алтухов В.М., Бгатов В.И., Ван А.В. Органо-минеральное сырье сельскохозяйственного назначения Новосибирской области. – Новосибирск: Изд-во СНИИГиМС, 1990. – 169 с.
9. Blyakharchuk T.A. Four new pollen sections tracing the Holocene vegetational development of the southern part of the West Siberian Lowland // The Holocene. – 2003. – V. 13. – № 5. – P. 715–731.
10. Regional to local environmental changes in southern Western Siberia: evidence from biotic records of mid to late Holocene sediments of Lake Beloye / S.K. Krivonogov, H. Takahara, M. Yamamoto, Yu.I. Preis, I.V. Khazina, L.B. Khazin, I.Yu. Safonova, N.V. Ignatova // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2012. – V. 331–332. – P. 177–193.
11. Биогенный вклад микроэлементов в органическое вещество современных озерных сапропелей (на примере оз. Кирек) / Г.А. Леонова, В.А. Бобров, Е.В. Лазарева, А.А. Богуш, С.К. Кривоногов // Литология и полезные ископаемые. – 2011. – № 2. – С. 115–131.
12. Исследование элементного состава образцов сапропеля озера Кирек (Западная Сибирь) методом РФА СИ / В.А. Бобров, М.А. Федорин, Г.А. Леонова, Ю.Н. Маркова, Л.А. Орлова, С.К. Кривоногов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2012. – № 5. – С. 90–96.
13. An abrupt ecosystem change in Lake Beloye, southern Western Siberia: palaeoclimate versus local environment / S.K. Krivonogov, M. Yamamoto, H. Takahara, A.Yu. Kazansky, M.A. Klimin, V.A. Bobrov, I.Yu. Safonova, M.A. Phedorin, S.B. Bortnikova // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2012. – V. 331–332. – P. 194–206.
14. Аномалии радиоактивности на южном побережье озера Иссык-Куль (Кыргызстан) / М.С. Мельгунов, В.М. Гавшин, Ф.В. Сухорук, И.А. Калугин, В.А. Бобров, Дж. Клеркс // Химия в интересах устойчивого развития. – 2003. – № 11. – С. 869–880.
15. Зарубина Е.Ю. Первичная продукция макрофитов трех разнотипных сапропелевых озер юга Западной Сибири (в пределах Новосибирской области) в 2012 году // Мир науки, культуры и образования. – 2013. – № 5 (42). – С. 441–444.
16. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1995. – V. 59. – № 7. – P. 1217–1232.
17. Геохимия озерно-болотного литогенеза / К.И. Лукашев, В.А. Ковалев, А.Л. Жуховицкая, А.А. Хомич, В.А. Генералова. – Минск: Изд-во «Наука и техника», 1971. – 284 с.
18. Two thousand years of atmospheric arsenic, antimony and lead deposition in an ombrotrophic bog profile, Jura Mountains, Switzerland / W. Shotyk, A.K. Cheburkin, P.G. Appleby, A. Fankhauser, Ya.D. Kramers // Earth and Planetary Science Letter. – 1996. – V. 145. – P. 1–7.
19. Геохимия диагенеза осадков Тихого океана (трансокеанский профиль) / А.Г. Розанов, И.И. Волков, В.С. Соколов, З.В. Пушкина. – М.: Наука, 1980. – 288 с.
20. Геохимия голоценового разреза сапропеля озера Минзелинское / А.Е. Мальцев, Г.А. Леонова, Л.М. Кондратьева, В.А. Бобров, С.К. Кривоногов // Геология морей и океанов: Матер. XX Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии. – М.: ГЕОС, 2013. – Т. IV. – С. 102–106.

Поступила 14.03.2014 г.

GEOCHEMICAL FEATURES OF HOLOCENE SECTION OF MINZELINSKOE LAKE SAPROPEL (WESTERN SIBERIA)

Anton E. Maltsev,

Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of Russian Academy of Science, 3, Akademika Kaptyuga avenue, Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: maltsev@igm.nsc.ru

Galina A. Leonova,

Dr. SC., Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of Russian Academy of Science, 3, Akademika Kaptyuga avenue, Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: leonova@igm.nsc.ru

Vladislav A. Bobrov,

Cand. Sc., Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of Russian Academy of Science, 3, Akademika Kaptyuga avenue, Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: bobr@igm.nsc.ru

Sergey K. Krivonogov,

Dr. Sc., Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of Russian Academy of Science, 3, Akademika Kaptyuga avenue, Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: s_krivonogov@mail.ru

Sapropel is biogenic lake sediment. It mainly consists of photosynthetic aquatic plants residues, and it is the important carbon storage. Therefore, the study of sapropelic lakes has not only theoretical but also applied value (agriculture, chemical industry, medicine).

The main aim of the study: investigation of the matter and chemical composition of the five-meter long sediment core of Lake Minzelinskoe, Novosibirsk region, obtained in the central part of the lake.

Methods used in the study: atomic absorption analysis, atomic emission spectrometry with inductively coupled plasma, X-ray fluorescence analysis, CHNS elemental analysis, sowing and counting microorganisms, radiocarbon dating, silicate X-ray fluorescence and X-ray diffraction analysis, high-resolution gamma-spectrometry a semiconductor using a HPGe detector, loss on ignition, dfissolution of carbonates, titrimetric, turbidimetric and photometric methods.

Results: It was ascertained that during the last 6000 years organic-mineral deposits of Lake Minzelinskoe have been formed (the Holocene). They consist of two layers: macrofitogenic sapropel (0–290 cm) and peaty sapropel (290–460 cm). The lake developed in two stages: first, it was formed as swampy lowland and then became a lake. The ratios of mineral to organic portions of the sediment are 40 and 60 % (interval 0–25 cm), 30 and 70 % (25–400 cm), and 20 and 80 % (400–450 cm), respectively. For 6000 years 13,8 g/cm² of carbon was accumulated: in macrophyte layer – 6,7 g/cm², in peaty – 7,07 g/cm², with an average speed of carbon receipt 23 mg/cm² per year. Unequal enrichment of different sediment layers by chemical elements reflects the changes in vegetation types and related biochemical reactions. Despite the layer differences, their chemical composition is rather stable, and it shows economic usability of the Lake Minzelinskoe sapropels.

Key words:

Sapropel, macrophytes, peat, microelements, organic matter.

REFERENCES

1. Shtin S.M. *Ozernye sapropeli i ikh kompleksnoe osvoenie* [Lake sapropels and their complex exploration]. Moscow, MGGU Publ., 2005. 373 p.
2. Plaksin G.V., Krivonos O.I. Termokhimicheskaya pererabotka ozernykh sapropeley: sostav i svoystva produktov [Thermochemical treatment of lake sapropels: their structure and features]. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2007, vol. LI, no. 4, pp. 140–147.
3. Zalessky M.D. O siluriyskoy vodorosli, obrazuyushchey kukersit – goryuchiy slanets [Silurian water plant which forms kukersite – shale coal]. *Zhurnal mikrobiologii*, 1916, vol. III, no. 3–4, pp. 444–449.
4. Zanin Yu.N., Zamiraylova A.G., Livshits V.R., Eder V.G. O roli skeletnogo i besskeletnogo biogenno materiala v formirovani organicheskogo veshchestva bazhenovskoy svity [The role of skeletal and nonskeletal biogenic material in formation of organic substance of Bazhenov group]. *Geologiya i geofizika*, 2008, vol. 49, no. 4, pp. 357–366.
5. Korde N.V. *Biostratigrafiya i tipologiya russkikh sapropeley* [Biostratigraphy and typology of Russian sapropels]. Moscow, AN SSSR Publ., 1960. 219 p.
6. Kurzo B.V., Gaydukevich O.M., Klyauzze I.V., Zdanovich P.A. Osobennosti formirovaniya veshchestvennogo sostava sapropelya organicheskogo tipa v ozerakh razlichnykh regionov Belarusi [Features of formation of organic type sapropel material composition in lakes of Belorussia regions]. *Prirodopolzovanie*, 2012, Iss. 21, pp. 183–191.
7. Topachevsky I.V. Sapropeli presnovodnykh vodoemov Ukrainy [Sapropels of freshwater habitats in Ukraine]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Mirovogo okeana*, 2011, no. 1, pp. 66–72.
8. Altukhov V.M., Bgatov V.I., Van A.V. *Organo-mineralnoe syre selskohozjajstvennogo naznachenija Novosibirskoy oblasti* [Organic mineral raw materials for agricultural use in Novosibirsk region]. Novosibirsk, SNIIGGiMS Publ., 1990. 169 p.
9. Blyakharchuk T.A. Four new pollen sections tracing the Holocene vegetational development of the southern part of the West Siberia.

- an Lowland. *The Holocene*, 2003, vol. 13, no. 5, pp. 715–731.
10. Krivonogov S.K., Takahara H., Yamamuro M., Preis Yu.I., Khazina I.V., Khazin L.B., Safonova I.Yu., Ignatova N.V. Regional to local environmental changes in southern Western Siberia: evidence from biotic records of mid to late Holocene sediments of Lake Beloye. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, vol. 331–332, pp. 177–193.
 11. Leonova G.A., Bobrov V.A., Lazareva E.V., Bogush A.A., Krivonogov S.K. Biogenny vklad mikroelementov v organicheskoe veshchestvo sovremennykh ozernykh sapropel' (na primere oz. Kirek) [Biogenic contribution of microelements into organic substance of current lake sapropels (by the example of the lake Kirek)]. *Litologiya i poleznye iskopaemye*, 2011, no. 2, pp. 115–131.
 12. Bobrov V.A., Fedorin M.A., Leonova G.A., Markova Yu.N., Orlova L.A., Krivonogov S.K. Issledovanie elementnogo sostava obrastsov sapropelya ozera Kirek (Zapadnaya Sibir) metodom RFA SI [Studying the elemental composition of sapropel sample in the lake Kirek (Western Siberia) by the XRF analysis]. *Poverhnost. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya*, 2012, no. 5, pp. 90–96.
 13. Krivonogov S.K., Yamamuro M., Takahara H., Kazansky A.Yu., Klimin M.A., Bobrov V.A., Safonova I.Yu., Phedorin M.A., Bortnikova S.B. An abrupt ecosystem change in Lake Beloye, southern Western Siberia: palaeoclimate versus local environment. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, vol. 331–332, pp. 194–206.
 14. Melgunov M.S., Gavshin V.M., Sukhorukov F.V., Kalugin I.A., Bobrov V.A., Klerkx J. Anomalii radioaktivnosti na yuzhnom poberezhye ozera Issyk-Kul (Kyrgyzstan) [Anomalies of radioactivity in the south coast of the lake Issyk-Kul]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2003, no. 11, pp. 869–880.
 15. Zarubina E.Yu. Pervichnaya produktsiya makrofitov trekh raznotipnykh sapropelevykh ozer yuga Zapadnoy Sibiri (v predelakh Novosibirskoy oblasti) v 2012 godu [Primary production of macrophytes of three different type saptopel lakes in the south of Western Siberia (within Novosibirsk region)]. *Mir nauki, kultury i obrazovaniya*, 2013, no. 5 (42), pp. 441–444.
 16. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, vol. 59, no. 7, pp. 1217–1232.
 17. Lukashev K.I., Kovale, V.A., Zhukhovitskaya A.L., Khomich A.A., Generalova V.A. *Geokhimiya ozerno-bolotnogo litogeneza* [Geochemistry of lake-swamp lithogenesis]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1971. 284 p.
 18. Shotyk W., Cheburkin A.K., Appleby P.G., Fankhauser A., Kramers Ya.D. Two thousand years of atmospheric arsenic, antimony and lead deposition in an ombrotrophic bog profile, Jura Mountains, Switzerland. *Earth and Planetary Science Letter*, 1996, vol. 145, pp. 1–7.
 19. Rozanov A.G., Volkov I.I., Sokolov V.S., Pushkina Z.V. *Geokhimiya diageneza osadkov Tikhogo okeana (transokeanskiy profil)* [Geochemistry of diagenesis of the Pacific ocean sediments (transocean profile)]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 288 p.
 20. Maltsev A.E., Leonova G.A., Kondrateva L.M., Bobrov V.A., Krivonogov S.K. Geokhimiya goltsenovogo razreza sapropelya ozera Minzelinskoe [Geochemistry of Holocene section of Minzelinsk lake sapropel]. *Geologiya morey i okeanov. Materialy XX Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (shkoly) po morskoy geologii* [Geology of seas and oceans. Proc. XX International scientific conference in marine geology]. Moscow, GEOS Publ., 2013. Vol. IV, pp. 102–106.