



УДК (550.47+549):[(552.5:550.72/73):551.794](571.14)

## МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ И ГЕОХИМИЯ ГОЛОЦЕНОВОГО РАЗРЕЗА САПРОПЕЛЯ ОЗЕРА МИНЗЕЛИНСКОЕ (НОВОСИБИРСКАЯ ОБЛАСТЬ)

А. Е. Мальцев, Е. В. Лазарева, Г. А. Леонова, В. А. Бобров, Л. В. Мирошниченко

Изучен химический и минеральный состав пятиметрового керна оз. Минзелинское (Новосибирская область). В течение 6000 лет в озере формировались органо-минеральные отложения с высоким содержанием карбонатов (до 70 %). Различаются макрофитогенный (0–290 см) и торфянистый сапропель (290–460 см), отражающие два этапа развития озера: сначала это была заболоченная низина, а позднее на ее месте образовалось озеро. Высокое содержание карбоната в сапропеле связано с отложением в результате хемогенного осаждения из раствора и биогенного накопления арагонита моллюсками и кальцита растениями-сапропелеобразователями. Кальцит содержит примесь Mg и Sr. По всему разрезу распространены биогенный кремнезем в виде створок диатомовых водорослей и окремненных частей макрофитов и фрамбоидальный пирит. В торфянистом сапропеле обнаружены новообразованные барит и гипс. В верхних горизонтах керна (0–30 см) наблюдается повышение содержания Zn, Cu и Ag, которое может быть связано с антропогенным загрязнением или микробиологическим концентрированием элементов.

**Ключевые слова:** сапропель, минеральный состав, биоминералы, минералообразование.

## MINERAL COMPOSITION AND GEOCHEMISTRY OF THE HOLOCENE SECTION SAPROPEL IN MINZELINSKOYE LAKE (NOVOSIBIRSK REGION)

A. E. Maltsev, E. V. Lazareva, G. A. Leonova, V. A. Bobrov, L. V. Miroshnichenko

The chemical and mineral composition of 5 m core in Mizelinskoye Lake, Novosibirsk region is studied. Organo-mineral sediments with high carbonate content (up to 70%) have been formed in the lake during 6,000 years. Macrophytogenic (0–290 cm) and peaty (290–460 cm) types of sapropel can be distinguished in the lake. These types reflect two accumulation stages – at first it was a swamped lowland and later it was transformed into a lake. High carbonate content in sapropel is associated with sedimentation due to chemogenic depositing from solution and biogenic accumulation of aragonite by mollusks and calcite by plants (sapropel-creators). Calcite contains an admixture of Mg and Sr. The biogenic silica is distributed throughout the section in the form of diatom valves and silicified parts of macrophytes and framboidal pyrite throughout the section. Neogenic barite and gypsum are discovered in a peaty sapropel. Increased contents of Zn, Cu and Ag are observed in upper core horizons (0–30 cm). It can be concerned with anthropogenic pollution or microbiological concentration of elements.

**Keywords:** sapropel, mineral composition, biominerals, mineral formation.

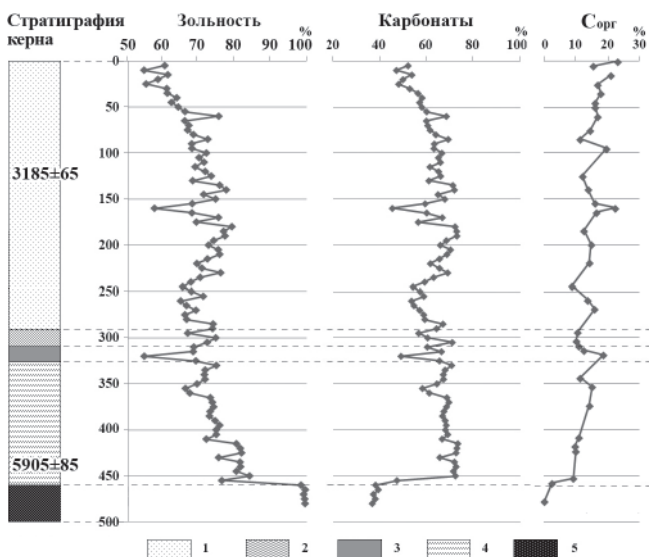
Накопление сапропелей – характерная черта бессточных озер умеренного пояса [8, 11]. Условия юга Западной Сибири благоприятны для сапропелеобразования. Большинство озер небольшие, мелководные, слабо- или непроточные. В настоящее время немного публикаций по исследованию сапропелей озер Западной Сибири, посвященных палеоклиматическим проблемам [12, 13] и геохимии озерных сапропелей [1, 6]. В рамках подробной инвентаризации залежей сапропелей в Новосибирской области проведено детальное изучение, включающее исследование геохимических и минералогических особенностей состава, объектом которого были сапропели оз. Минзелинское, содержащего значительные запасы сырья.

Озеро Минзелинское расположено на террасе левого берега р. Обь в северо-восточной части Колыванского района Новосибирской области. Длина озера 12 км, наибольшая ширина 2,2 км, средняя глубина менее 1 м (максимальная 3,5 м), площадь 12,5 км<sup>2</sup>, запасы сапропеля около 8160 тыс. т [9].

Притоков озеро не имеет, из него вытекает р. Крутишка. Озеро расположено среди леса (кедр, сосна, береза) и обширных болот. Тип зарастания водоема смешанный: сочетание сплави́н и обширных зарослей. В прибрежной зоне доминируют макрофиты: тростник (*Phragmites australis*), рогоз (*Typha latifolia*), различные виды осок, в акватории основным погруженным макрофитом является уруть (*Myriophyllum sibiricum*). В августе 2012 г. в озере вибрационным методом с использованием поршневого пробоотборника пробурена скважина (координаты 55°53' с. ш., 83°23' в. д.) глубиной 5 м [13]. Керн диаметром 7,5 см непрерывный и имеет ненарушенную структуру.

Согласно классификации А. И. Перельмана [10], воды озера относятся к группе холодных, типу окисленных ( $E_h = 300$  мВ,  $O_2 = 4,3$  мг/л), классу нейтральных и слабощелочных ( $pH = 8,3$ ), семейству пресных вод (минерализация 0,23 г/л), гидрокарбонатному виду с комплексным катионным составом, в котором преобладает Ca, но доли Na и Mg высоки ( $HCO_3^- 158$ ,  $Cl^- 24,4$ ,  $SO_4^{2-} 2,3$ ,  $Ca^{2+} 20$ ,  $Mg^{2+} 8$ ,  $Na^+ 12$ ,  $K^+ 0,2$  мг/л).

ИГМ СО РАН (Новосибирск)



**Рис. 1.** 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 – сильно разложившийся торфянистый сапропель (320–460 см); 5 – песок (460–500 см). Зо́льность определена при прокаливании осадка при 450 °С

Верхний слой озерных отложений представлен макрофитогенным сапропелем, ниже залегает разложившийся торфянистый сапропель, его подстилает слой торфа, переходящий в темный сильно разложившийся (заметны процессы гумификации) торфянистый сапропель с большим количеством раковин *Planorbidae* и *Ostracoda* (рис. 1). Наличие этих скоплений, по-видимому, отражает кратковременную фазу мелководного эвтрофного водоема. Озерные отложения подстилаются песком. По данным радиоуглеродного дати-

рования длительность накопления сапропеля оценивается в 6000 лет.

В интервале 0–460 см от нижних горизонтов к верхним наблюдается плавное снижение зо́льности, содержания карбоната и увеличение содержания  $C_{орг}$  (см. рис. 1). Эта тенденция может быть связана как с деструкцией органического материала к нижним слоям осадка, так и с разным его вещественным составом.

Из породообразующих элементов преобладает Ca (см. таблицу). Содержание CaO в указанном интервале варьирует от 18 до 40 %. Принимая Al в качестве основного элемента терригенного материала и используя соотношения Ca к Al, рассчитанные для верхней континентальной коры [14], терригенный вклад CaO в сапропеле нами оценен всего в 0,21–0,65 %. Содержание  $SiO_2$  в интервале 0–460 см с глубиной изменяется от 4 до 11,5 %, а в песчаном слое достигает 82 %. Содержание  $Fe_2O_3$  в интервале керна 420–450 см увеличивается до 4 %, при том что в верхней части разреза оно колеблется от 0,8 до 2 %.

Содержание Fe (~ 1 %) довольно выдержанное до глубины 350 см, ниже значительно увеличивается (до 3,3 %), а в песке (460–480 см) падает до 1,6 % (рис. 2). Концентрация Ca в сапропеле меняется от 15 до 24 % с максимальным значением 38 % (70–75 см), Mg и Sr – плавно увеличивается вниз по разрезу от 0,45 до 1,2 % и от 0,07 до 0,14 %, соответственно. В песке Ca, Mg и Sr значительно меньше, чем в вышележащем сапропеле – 1,6, 0,36 и 0,02 % соответственно. Наиболее высокие содержания Zn (824 г/т) и Cu (204 г/т) отмечаются в приповерхностном слое сапропеля (0–10 см), уменьшаясь до 300 и 58 г/т на глубине 90 см; ниже их на порядок меньше, чем в слое 0–10 см. Исключение составляют интервалы 180–

Химический состав донного осадка оз. Минзелинское (данные на сухое вещество), %, по результатам РФА

Интервал керна, см	ППП	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	MgO	CaO	$Na_2O$	$K_2O$	$P_2O_5$	$SO_3$
0–2	67,9	9,1	1,7	1,2	0,7	17,9	0,2	0,3	0,3	0,3
15–20	63,5	5,1	1,0	1,1	0,9	27,3	0,2	0,2	0,2	0,3
55–60	60,1	3,9	0,8	0,8	1,0	32,4	0,2	0,1	0,3	0,3
80–85	58,5	3,3	0,7	0,8	1,1	34,9	0,2	0,1	0,2	0,3
135–140	53,1	3,6	0,8	1,1	1,2	39,6	0,1	0,1	0,2	0,2
155–160	61,7	5,3	1,2	1,4	0,9	28,2	0,2	0,2	0,2	0,3
215–220	56,2	4,6	1,1	1,5	1,5	34,1	0,2	0,1	0,2	0,3
255–260	56,3	8,7	1,	1,8	1,5	28,2	0,3	0,3	0,2	0,4
290–295	54,6	7,5	1,6	1,7	1,7	31,4	0,3	0,2	0,2	0,3
300–305	50,6	11,6	2,3	2,0	1,8	29,4	0,4	0,3	0,3	0,3
305–310	55,4	5,7	1,2	1,5	1,9	32,7	0,3	0,2	0,2	0,4
315–320	63,6	3,7	0,9	1,8	1,6	27,1	0,2	0,1	0,2	0,5
350–355	59,3	3,6	0,9	1,8	2,1	31,0	0,2	0,1	0,2	0,6
415–420	43,8	7,5	1,6	4,0	1,9	33,6	0,4	0,2	0,2	5,7
450–455	35,0	25,7	3,6	3,6	1,2	23,4	0,8	0,7	0,2	5,1
460–465	9,2	67,8	7,2	2,4	0,9	7,4	1,7	1,6	0,1	1,4
475–480	1,7	82,1	7,6	1,9	0,6	2,3	1,9	1,9	0,1	0,4

Примечание: ППП – потери при прокаливании на воздухе при 900 °С.

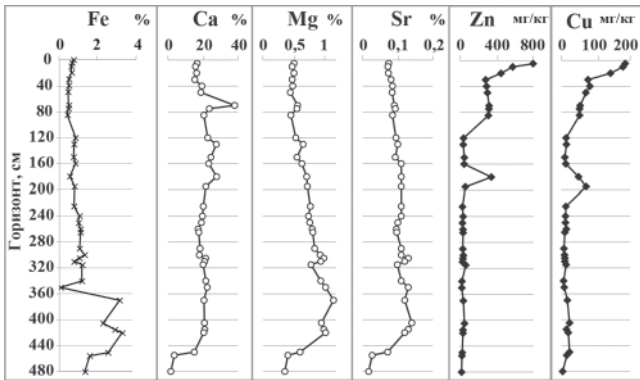


Рис. 2. Изменение содержаний Fe, Ca, Mg, Sr, Zn и Cu в разрезе сапропеля озера по данным ААС

185 см для Zn с пиком в 354 г/т, 180–200 см для Cu, где наблюдается увеличение до 54,8–79 г/т. В верхних 2 см сапропеля установлены высокие содержания Ag (44,6 г/т), ниже по разрезу они колеблются от 0,04 до 0,22 г/т.

Основные минералы сапропеля оз. Минзелинское по данным рентгенофазового анализа – кальцит, Mg-кальцит, арагонит, кварц, пирит, гипс, плагиоклаз. Кальцит в основном преобладает над арагонитом, и только в интервалах с большим количеством раковин доля арагонита увеличивается. Известно, что некоторые водные макрофиты накапливают Ca в значительных количествах. Высушенные фрагменты макрофита уруть были исследованы на сканирующем электронном микроскопе. Внутри растения закономерно по определенным направлениям отлагаются агрегаты кальцита в виде однородных (10 мкм) сферолитов (рис. 3, а, б). Форма и размеры агрегатов свидетельствуют об одновременном их зарождении и быстром росте. Кальцит содержит примесь Mg (~1 мас. %) и Sr (0,6 мас. %). Таким образом, учитывая первичную продукцию урути 390 г/м<sup>2</sup> ОВ в год на 2012 г. (по данным [5]), можно предположить что вклад биогенного CaCO<sub>3</sub> в осадок озера значителен.

В донном осадке кальцит в основном присутствует в виде тонкозернистой сплошной массы. Возможно, сферолиты из макрофита уруть при захоронении растения перекристаллизуются или частично растворяются в процессе деструкции органического вещества и минерал повторно преотлагается. В качестве примесей в кальците сапропеля установлен Mg (1–2,5 мас. %). В арагоните раковин гастропод (см. рис. 3, з) не установлено примесей. В остатках растений и органическом веществе сапропеля содержится 4–13 мас. % Ca.

По всему интервалу 0–460 см установлены фрамбоиды пирита (см. рис. 3, г). Присутствие пирита в верхних горизонтах керна свидетельствует об активной деятельности сульфатредуцирующих бактерий уже в слое сапропеля 0–2 см [3]. Выявлено большое количество частиц размером не более 5 мкм, основными элементами которых являются Zn и Cu (см. рис. 3, д). Эти частицы,

с которыми может быть связано Ag, могут иметь антропогенное происхождение, но нельзя исключать их образование за счет деятельности микроорганизмов.

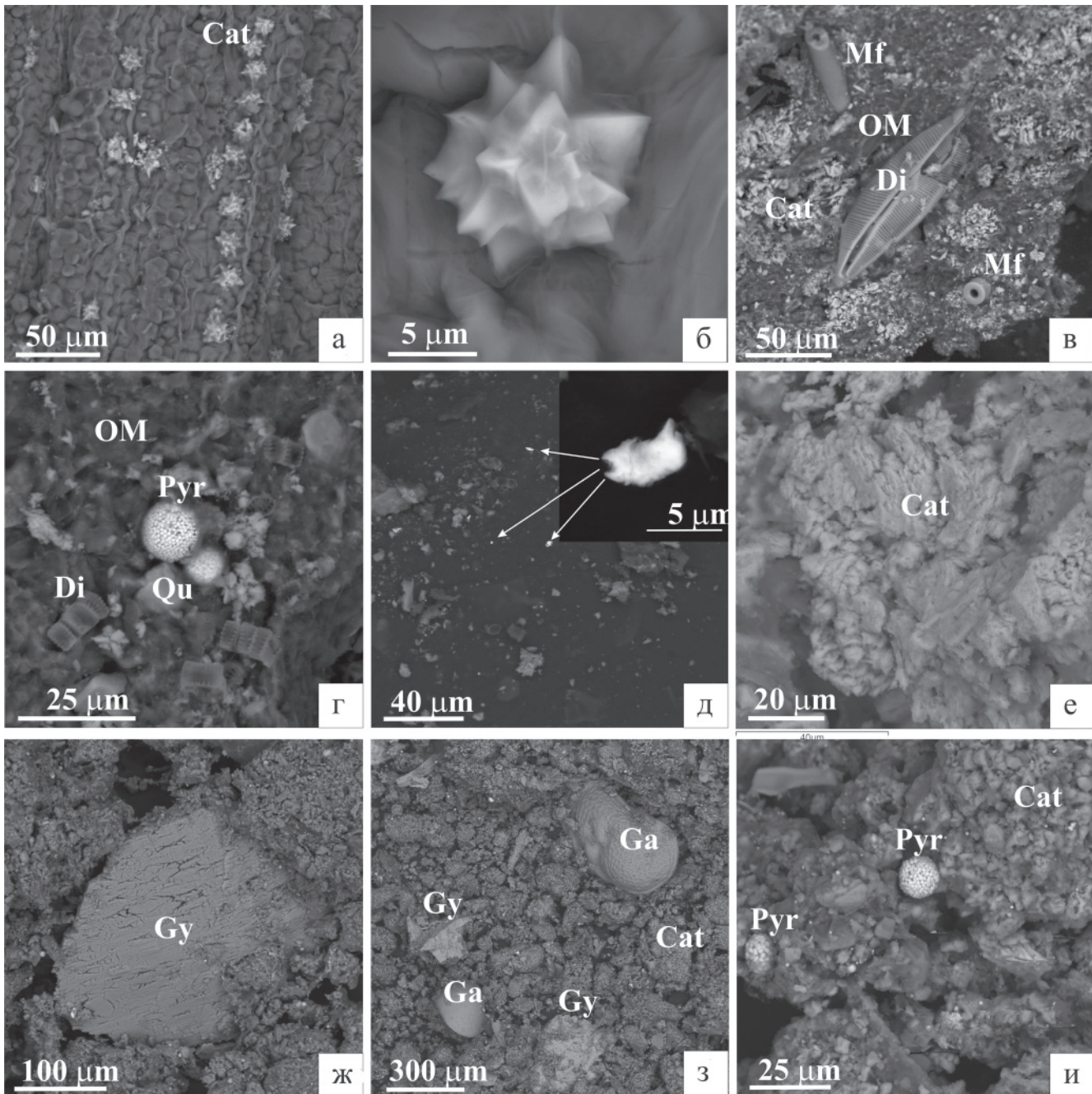
В торфянистом сапропеле (315–320 см) основным минералом также является кальцит, содержащий примесь Mg (1,7 мас. %) (см. рис. 3, е). Встречаются гипс в виде крупных (до 500 мкм) трещиноватых короткопризматических кристаллов (см. рис. 3, ж) и их обломков (см. рис. 3, з) и зерна призматических выделений барита размером меньше 10 мкм. Можно предположить, что барит образуется в донном осадке. Уменьшение содержания C<sub>орг</sub> до 10–15 % в этом горизонте может свидетельствовать о процессах деструкции ОВ и накопления ионов SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> в поровом растворе. При наличии Ba в растворе элемент будет реагировать с SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> с образованием барита. В торфянистом сапропеле (см. рис. 3, з) присутствуют раковины остракод (*Ostracoda*). В нижних горизонтах керна содержание пирита значительно выше, чем в верхних, что отражается и на увеличении содержания Fe до 4 % (см. таблицу). Обнаружение фрамбоидального пирита на нижних горизонтах керна (см. рис. 3, и), свидетельствует об активной деятельности сульфатредукторов. По данным [2], в этих горизонтах обнаружена максимальная численность микроорганизмов (гетеротрофные, аммонифицирующие, нитрифицирующие бактерии).

Помимо терригенного кварца, в осадке установлено значительное содержание биогенного кремнезема в виде створок диатомовых водорослей рода *Cymbella* (см. рис. 3, в) и *Synedra* (см. рис. 3, г), кремневых частей макрофитов (см. рис. 3, в).

Таким образом, основная минеральная масса сапропеля представлена автохтонными карбонатами: в основном кальцитом (с примесью Mg) и арагонитом. Арагонит полностью имеет биогенную природу и представлен раковинами гастропод и остракод. Значительная часть кальцита в осадке, без сомнений, также имеет биогенное происхождение, образуясь в первую очередь внутри растений. Но возможно и хемогенное образование кальцита, учитывая состав вод озера. В будущем предполагается провести дополнительные исследования, балансовые оценки и оценить долю биогенного и хемогенного кальцита в осадке. Наличие фрамбоидального пирита уже в первых 2 см осадка свидетельствует об активных процессах сульфатредукции. С деятельностью микроорганизмов может быть связано увеличение содержания Zn, Cu и Ag в верхнем горизонте. Усредненный состав всего слоя органогенных озерных отложений (0–460 см) следующий: 30 % – органическое вещество, 60 % – карбонат кальция (кальцит и арагонит), 10 % – терригенный компонент (кварц, плагиоклаз).

По содержанию C<sub>орг</sub>, карбонатов и величине зольности отложения оз. Минзелинское отнесены





**Рис. 3.** Основные минералы, слагающие сапропель оз. Минзелинское: а, б – сферолиты кальцита внутри сапропелеобразующего растения уруть (*Myriophyllum sibiricum*); в – диатомовые водоросли (Di) рода *Symbella* и кремненые остатки макрофитов (Mf) среди органического вещества (OM) и кальцита (Cat); г – фрамбонды пирита (Pyr) и створки диатомовой водоросли (Di) рода *Synedra*; д – частицы Cu-Zn сплава; е – мелкозернистая масса кальцита (Cat) в торфе; ж – трещиноватый кристалл гипса (Gy), горизонт 315–320 см; з – створки гастропод (Ga) и фрагменты кристаллов гипса (Gy) среди массы кальцита (Cat), горизонт 415–420 см; и – фрамбонды пирита (Pyr) среди массы Mg-кальцита (Cat), горизонт 450–455 см. Фото – электронный сканирующий микроскоп TESCAN MIRA 3 LMU

к органо-минеральным известковистым сапропелям согласно [4, 7]. Высокое содержание карбонатов – важная геохимическая характеристика сапропеля оз. Минзелинское.

Работа выполнена при финансовой поддержке ИП СО РАН №125.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Биогенный** вклад микроэлементов в органическое вещество современных озерных сапропелей (на примере оз. Кирек) [Текст] / Г. А. Леонова, В. А. Бобров, Е. В. Лазарева [и др.] // Литология и полезные ископаемые. – 2011. – № 2. – С. 115–131.

2. **Геохимия** голоценового разреза сапропеля озера Минзелинское [Текст] / А. Е. Мальцев, Г. А. Леонова, Л. М. Кондратьева [и др.] // Геология морей и океанов : матер. XX Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии. Т. IV. – М. : ГЕОС, 2013. – С. 102–106.

3. **Геохимия** диагенеза осадков Тихого океана (трансoкеанский профиль) [Текст] / Под ред. Э. А. Остроумова. – М. : Наука, 1980. – 288 с.



4. **Геохимия** озерно-болотного литогенеза [Текст] / К. И. Лукашев, В. А. Ковалев, А. Л. Жуховицкая [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1971. – С. 96–207.

5. **Зарубина, Е. Ю.** Первичная продукция макрофитов трех разнотипных сапропелевых озер юга Западной Сибири (в пределах Новосибирской области) в 2012 году [Текст] / Е. Ю. Зарубина // Мир науки, культуры и образования. – 2013. – № 5(42). – С. 441–444.

6. **Исследование** элементного состава образцов сапропеля озера Кирек (Западная Сибирь) методом РФА СИ [Текст] / В. А. Бобров, М. А. Федорин, Г. А. Леонова [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2012. – № 5. – С. 90–96.

7. **Кордэ, Н. В.** Биостратиграфия и типология русских сапропелей [Текст] / Н. В. Кордэ. – М. : Изд-во АН СССР, 1960. – 219 с.

8. **Особенности** формирования вещественного состава сапропеля органического типа в озерах различных регионов Беларуси [Текст] / Б. В. Курзо, О. М. Гайдукевич, И. В. Кляуззе, П. А. Зданович // Природопользование. – 2012. – Вып. 21. – С. 183–191.

9. **Органо-минеральное** сырье сельскохозяйственного назначения Новосибирской области [Текст] / Под ред. А. И. Бгатова и др. – Новосибирск : СНИИГиМС, 1990. – 169 с.

10. **Перельман, А. И.** Геохимия [Текст] / А. И. Перельман. – М. : Высшая школа, 1989. – 528 с.

11. **Топачевский, И. В.** Сапропели пресноводных водоемов Украины [Текст] / И. В. Топачевский // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2011. – № 1. – С. 66–72.

12. **Blyakharchuk, T. A.** Four new pollen sections tracing the Holocene vegetational development of the southern part of the West Siberian Lowland [Text] / T. A. Blyakharchuk // The Holocene. – 2003. – Vol. 13, N 5. – P. 715–731.

13. **Regional** to local environmental changes in southern Western Siberia: evidence from biotic records of mid to late Holocene sediments of Lake Belye [Text] / S. K. Krivonogov, H. Takahara, M. Yamamoto [et al.] // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. – 2012. – Vol. 331–332. – P. 177–193.

14. **Wedepohl, K. H.** The composition of the continental crust [Text] / K. H. Wedepohl // Geochim. et Cosmochim. Acta. – 1995. – Vol. 59, N 7. – P. 1217–1232.

© А. Е. Мальцев, Е. В. Лазарева, Г. А. Леонова, В. А. Бобров, Л. В. Мирошниченко, 2014