

## БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ САПРОПЕЛЕЙ С РАЗЛИЧНЫМ ГЕНЕЗИСОМ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА — ПЛАНКТОННЫМ И МАКРОФИТОВЫМ (НА ПРИМЕРЕ ОЗЕР СИБИРСКОГО РЕГИОНА)

Г.А. Леонова<sup>1</sup>, А.Е. Мальцев<sup>1</sup>, В.А. Бобров<sup>1</sup>, С.К. Кривоногов<sup>1</sup>, А.А. Богущ<sup>1</sup>, В.Д. Тихова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск,  
*leonova@igm.nsc.ru*

<sup>2</sup>Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН, Новосибирск,  
*Tikhova@nioch.nsc.ru*

Органическое вещество (ОВ) донных осадков является их важнейшей характеристикой, определяющей геохимические свойства и облик в целом. Изучение закономерностей распределения и накопления ОВ в осадках имеет большое теоретическое и практическое значение и, в частности, позволяет вскрыть условия накопления крупных масс ОВ, исходного для биогенных отложений типа сапропелей, нефти и газа (Романкевич, 1977). ОВ различного генезиса и вмещающая его минеральная основа образуют сложную гетерогенную систему осадков, для познания которой надо знать особенности распределения и морфологию ОВ. В современных осадках выделяют несколько морфологических (отчасти генетических) форм ОВ (Емельянов, Романкевич, 1979): 1) органический детрит и агрегаты ОВ (преимущественно автохтонное ОВ); 2) остатки растительности суши и макрофитов; пыльца и споры (преимущественно аллохтонная компонента, берегов — смесь авто- и аллохтонного ОВ); 3) ОВ биогенного известкового и кремневого скелетного материала; 4) ОВ костных остатков ихтиофауны и другие формы ОВ.

Типизация озерных отложений на основании изучения компонентного состава их органической части разработана недостаточно, редким исключением является попытка М.М. Соловьева (1935) разделить сапропели озер Белоруссии на олиго-, мезо- и полигумозные по содержанию в них битумов. Из всех известных классификаций сапропелей наиболее обоснованной, на взгляд авторов, является предложенная Н.В. Кордэ (1960) генетическая классификация, в основу которой положен палеолимнический подход, а основными показателями, которые помогают вскрыть особенности летописи прошлого, «записанные» в разрезах сапропелевых толщ, являются биологические данные. Именно на принципе совместного использования биологических и некоторых химических данных Н.В. Кордэ установлены *биологические типы озерных отложений*.

Сапропели, по определению Н.В. Кордэ (1960), — это современные или субфоссильные, тонкоструктурные, коллоидальные отложения континентальных водоемов, содержащие значительное количество ОВ и оформленных остатков микроскопических водных организмов, некоторое количество неорганических компонентов биогенного происхождения и минеральных примесей приносного характера. Генетически близки сапропелям торфа, но сапропели отличаются от торфов своей тонкой структурой. Существуют также биогенные отложения, переходные между торфами и сапропелями, характерные для неглубокой зарастающей макрофитами литорали озер и содержащие значительное количество остатков не вполне разложившейся высшей водной растительности. Такие сапропели по определению Г. Потонье (1920) называются торфянистыми.

Накопление сапропелей является характерной чертой бессточных озер умеренного пояса Сибири. Физико-географические условия территории юга Западной Сибири благоприятны для сапропелеобразования: плоский слаборасчлененный рельеф, незначительный уклон на север, относительно теплый климат, избыток влаги наряду с процессами выветривания и размыва обеспечивают поступление в озера достаточного количества биогенных компонентов, что содействует развитию в них органической жизни. Большинство расположенных здесь сапропелевых озер мелкие, слабопроточные или непроточные, с накоплением в донных осадках органики и железа, что характерно для гумидной зоны (Джабарова, Немирович-Данченко, 1982). Климатические условия Южного Прибайкалья и, в частности, предгорной полосы между северным фасом хребта Хамар-Дабан и озером Байкал, где понижения рельефа заняты

озерами и болотами, довольно мягкие. Значительная увлажненность обусловлена физико-географическими особенностями: наличием высокого горного хребта, собирающего влагу, и озера Байкал, отепляющего территорию. Климат влияет на гидрохимический режим рек и озер, определяя малую минерализацию вод в период их наибольшей водности, а снеговые талые воды вызывают резкое снижение минерализации весной (Флора..., 2001).

Наибольший интерес для авторов представляют осадки малых озер сибирского региона, содержащие более 50 % ОВ, т.е. собственно сапропели по классификации Н.В. Кордэ (1960), широко распространенные в озерах юга Западной Сибири (Джабарова, Немерович-Данченко, 1982; Krivonogov et al., 2012) и Южного Прибайкалья (Безрукова и др., 2008). Основная цель проводимых нами исследований — выявление биогеохимических особенностей сапропелей, сформировавшихся за период голоцена (12000 л.н.), и установление генезиса ОВ сапропелей. Решение подобных задач требует комплексного подхода — исследования био- и литостратификации, вещественного и химического состава длинных ненарушенных кернов сапропеля, полученных путем бурения скважин в озерах на всю глубину залегания сапропелевых отложений.

Объектами наших исследований в Западной Сибири стали шесть сапропелевых озер: Белое (Кольванский район, координаты бурения скважины – 55° 23' с.ш., 82° 41' в.д.); Минзелинское (Кольванский район, 55° 32' с.ш.; 83° 14' 03,1" в.д.); Большие Тороки (Каргатский район, 55° 23' 36,7" с.ш.; 80° 37' 06,8" в.д.); Иткуль (Каргатский район, 55° 03' 55,3" с.ш.; 81° 02' 35,2" в.д.); Саргуль (Здвинский район, 54° 35' 30,3" с.ш.; 78° 52' 49,5" в.д.) Новосибирской области и Кирек (56° 10' с.ш., 84° 22' в.д.) юг Томской области. В Южном Прибайкалье — три озера: Очки (51° 29' с.ш., 104° 52' в.д.); Духовое (53° 18' с.ш., 108° 53' в.д.) и Котокель (52° 46' 56,9" с.ш.; 108° 07' 13,7" в.д.).

В малых озерах сибирского региона в настоящее время формируются два биологических типа сапропелей: планктоногенный — основным продуцентом ОВ сапропелей является планктон и макрофитогенный — основным продуцентом ОВ сапропелей являются макрофиты. Промежуточный тип — смешанный планктоно-макрофитогенный (Леонова, Бобров, 2012). При установлении генезиса ОВ сапропелей в первую очередь исследуется современный озерный биоценоз, и в нем выделяются доминирующие виды-продуценты ОВ (сапропелеобразователи), дающие наибольшую биомассу, т.е. выделяется современный источник поставки автохтонного ОВ в озерный осадок. Генезис фоссилизированного ОВ по глубине стратифицированной колонки сапропеля устанавливается по отношению органического углерода к азоту ( $C_{орг}/N$ ), косвенно указывающего на генетическую связь ОВ осадков с исходным органическим материалом — либо автохтонным (планктоном и макрофитами), либо аллохтонным (наземной растительностью) (Виноградов, 1944). Известно, что высшая водная и наземная растительность бедна азотом и имеет высокое значение  $C_{орг}/N$  (20–40) (Скопинцев, 1977), для диатомового планктона это отношение составляет 5,5–7,0 (Харвей, 1948), для байкальского фитопланктона оно близко к 10 (Вотинцев, 1961; Выхристюк, 1980). В сапропеле оз. Духовое отношение  $C_{орг}/N$  варьирует от 5,74 до 8,67, следовательно, его источником являлся именно фитопланктон (Леонова и др., 2012). Также при установлении генезиса фоссилизированного ОВ используются молекулярные биомаркеры, достаточно надежно подтверждающие генезис незрелого ОВ в современных озерных осадках (Меленевский и др., 2011). Так, нечетные гомологи углеводов  $nC_{29}$  и  $C_{31}$  (биомаркеры макрофитов), найденные в сапропеле озера Белое с использованием пиролитических методов, указывают на макрофитогенную природу ОВ.

По нашему предварительному заключению, различия физико-географических и климатических условий обуславливают формирование в настоящее время в малых озерах Южного Прибайкалья преимущественно планктоногенных сапропелей (озера Духовое, Очки, Котокель), а в озерах юга Западной Сибири — макрофитогенных сапропелей (озера Белое, Большие Тороки, Минзелинское). В оз. Кирек (Томская область) формируются два типа сапропелей: в центре озера в его глубоководной части (7 м) — планктоногенный, а в прибрежной части до глубины 5 м — макрофитогенный (Леонова и др., 2011).

На рис. 1 показано строение залежи сапропеля оз. Минзелинского. По данным радиоуглеродного датирования, ее возраст оценивается в 5900 лет. Содержание ОВ по всей

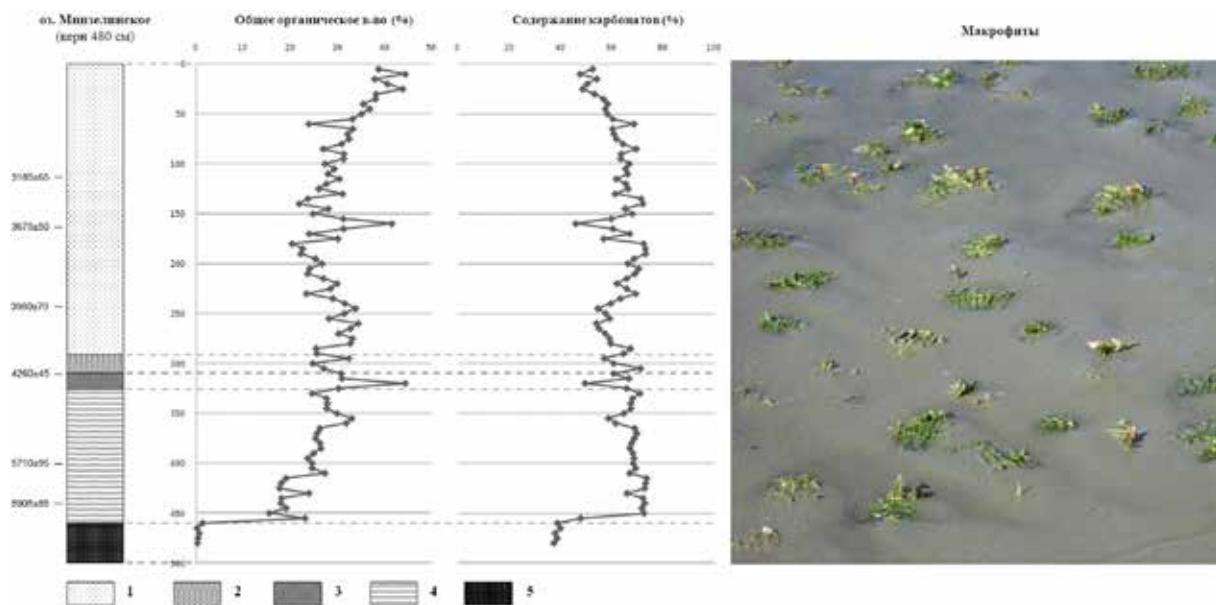


Рис. 1. Литостратиграфия, содержание органического вещества и карбонатов в сапропеле оз. Минзелинское. 1 (0–291 см) — макрофитогенный сапропель; 2 (291–307 см) — торфянистый сапропель; 3 (307–318 см) — торф со скоплением раковин гастропод; 4 (318–460 см) — торфянистый сапропель с раковинами гастропод; 5 (460–500 см) — песок. На фото показаны макрофиты на поверхности сапропелевой залежи

глубине колонки довольно однородно и варьирует в пределах 40–20 %. Однако природа ОВ разная, т.е. различны источники исходного органического материала. До глубины 290 см залегает макрофитогенный сапропель, автохтонный источник ОВ — макрофиты. Ниже расположен узкий (10 см) прослой торфянистого сапропеля, сапропелеобразующий материал которого — растения-торфообразователи (аллохтонный источник ОВ). С глубины 307 см залегает слой торфа, а ниже в интервале глубин 318–460 см его вновь подстилает торфянистый сапропель. Таким образом, строение отложений указывает на изменения условий сапропелеобразования — повышение и понижение уровня воды в озере.

На рис. 2 показано строение отложений оз. Духовое. Донные осадки представлены темно-окрашенным рыхлым планктоногенным сапропелем (0–180 см), ниже которого залегает минеральный слой рыжевато-коричневого цвета плотной структуры (180–574 см). Различие в вещественном составе слоев иллюстрирует распределение органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ): его высокие концентрации прослеживаются до глубины 180 см, ниже по разрезу его содержание резко падает. Исследование вещественного состава осадков на сканирующем электронном микроскопе показывает четко различимые отдельные организмы фитопланктона разных видов в слое 0–180 см; глубже 180 см они отсутствуют (Bogush et al., 2013). Планктонный генезис ОВ сапропеля оз. Духовое подтверждается величиной отношения  $C_{\text{орг}}/N$  (5,74–8,67), а также исследованием современного биоценоза озера, который преимущественно представлен микроскопическими водорослями фитопланктона: зеленые — 16 видов, сине-зеленые — 9, диатомовые — 8 (Леонова и др., 2012).

Планктоногенные сапропели, формирующиеся в настоящее время в озерах Южного Прибайкалья (Очки и Духовое), в геохимическом отношении резко отличаются от макрофитогенных сапропелей озер Западной Сибири (Белое и Кирек). В оз. Очки с ультрапресными термальными холодными водами сульфатного класса в настоящее время происходит формирование *планктоногенного низкожелезистого, низкокальцевого* сапропеля: Fe — 0,67 %, Ca — 0,43 %, зольность — 27 %, ОВ — 73 % (Бобров и др., 2010). Сходный низкожелезистый (Fe — 2,7 %), низкокальцевый (Ca — 0,67 %) и низкозольный (28 %) сапропель с высоким содержанием ОВ (73 %) образуется в оз. Духовое с гидрокарбонатным классом вод (Леонова и др., 2012; Мальцев и др., 2012). В оз. Кирек в центральной части (глубина 7 м)

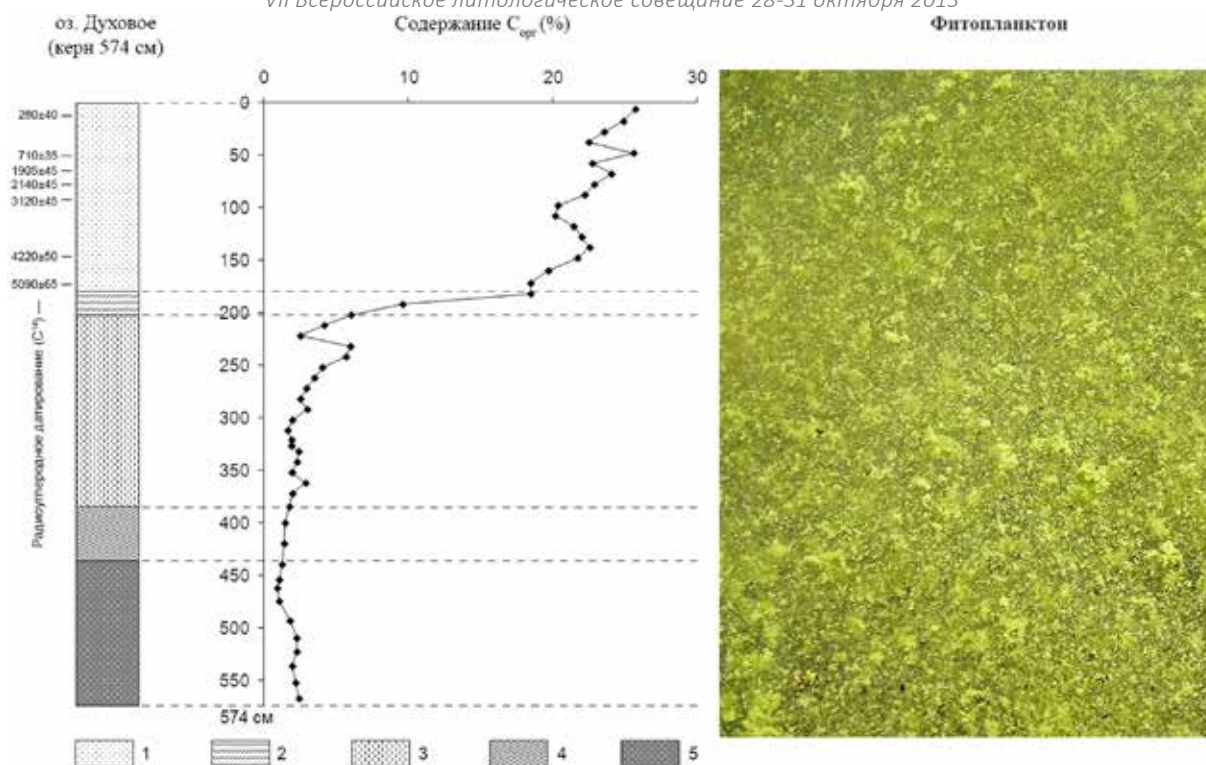


Рис. 2. Литостратиграфия и содержание органического углерода в донных осадках оз. Духовое. 1 (0–180 см) — планктоногенный сапропель; 2 (180–205 см) — глинистый ил рыхлый темный; 3 (205–393 см) — глинистый ил плотный серо-сизый; 4 (393–445 см) — глины, темно-серые; 5 (445–574 см) — опесчаненные глины. На фото показан фитопланктон в поверхностных горизонтах воды оз. Духовое

формируется *планктоногенный высокожелезистый, низкокальциевый сапропель*: Fe — 16 %, Ca — 3,8 %, зольность — 47 %, ОВ — 53 %.

Наиболее важный геохимический показатель макрофитогенных сапропелей — высокое содержание кальция. В настоящее время в озерах Западной Сибири формируются *высококальциевые, низкожелезистые сапропели*: в оз. Белое по всей акватории (Ca — 27 %, Fe — 1,1 %, зольность — 80 %, ОВ — 20 %), в оз. Кирек в прибрежной зоне до глубины 5 м (Ca — 18 %, Fe — 3 %, зольность — 70 %, ОВ — 30 %).

Формирование подобных биогеохимических разновидностей сапропелей во многом обусловлено химическим составом (минерализация, класс), физико-химическими условиями (рН, Eh) озерных вод и продуцентами ОВ (планктон, макрофиты, растения-торфообразователи).

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 08-05-00392, 11-05-00655, офи-м-2011 № 11-05-12038), Междисциплинарного интеграционного проекта № 125.*

#### Литература

Безрукова Е.В., Кривоногов С.К., Такахара Х., Летунова П.П., Шичи К., Абзаева А.А., Кулагина Н.В., Забелина Ю.С. Озеро Котокель — опорный разрез позднеледниковья и голоцена юга Восточной Сибири // Докл. РАН. 2008. Т. 420, № 2. С. 248–253.

Бобров В.А., Леонова Г.А., Федорин М.А., Кривоногов С.К., Бычинский В.А., Краснобаев В.А. Элементный состав органогенных осадков озера Очки (Прибайкалье), сформировавшихся в голоцене // Успехи органической геохимии. Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2010. С. 40–44.

Виноградов А.П. Химический элементарный состав организмов моря. М., 1944. С. 44–57.

Вотинцев К.К. Гидрохимия оз. Байкал. М.: Наука, 1961. 311 с.

Выхристюк Л.А. Органическое вещество донных осадков Байкала. Новосибирск: Наука, 1980. 79 с.

Джабарова Н.К., Немирович-Данченко Л.А. Физико-химическая характеристика сапропелей озера Кирек // Курортные ресурсы и санаторно-курортное лечение в Сибири. Томск, 1982. С. 31–36.

Емельянов Е.М., Романкевич Е.А. Геохимия Атлантического океана. Органическое вещество и фосфор. М.: Наука, 1979. 219 с.

Кордэ Н.В. Биостратиграфия и типология русских сапропелей. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 219 с.

Леонова Г.А., Бобров В.А. Геохимическая роль планктона континентальных водоемов Сибири в концентрировании и биоседиментации микроэлементов. Новосибирск: Акад. изд-во «Гео», 2012. 308 с.

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

Леонова Г.А., Богуш А.А., Кривоногов С.К., Тихова В.Д., Кондратьева Л.М., Росляков А.Н., Мальцев А.Е., Бобров В.А. Некоторые аспекты диагенетического преобразования органогенных отложений оз. Духовое (Южное Прибайкалье) // Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде: Матер. VII Междунар. науч.-практ. конф. Т. 1. Семей: Изд-во СГПИ, 2012. Т. 1. С. 46–54.

Мальцев Е.А., Бобров В.А., Леонова Г.А., Богуш А.А., Бычинский В.А. Особенности распределения химических элементов в поровых водах и в сапропеле оз. Духовое как отражение процессов раннего диагенеза // Современные проблемы геохимии: Матер. Всерос. совещания, посвященного 95-летию со дня рождения академика Л.В. Таусона. Иркутск: Изд-во ин-та географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2012. Т. 1. С. 183–186.

Меленевский В.Н., Леонова Г.А., Коньшев А.С. Результаты исследования органического вещества современных осадков озера Белое (Западная Сибирь) по данным пиролитических методов // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 6. С. 751–762.

Потонье Г. Сапропелиты // Нефтяное и сланцевое хозяйство. Петроград: Изд-во Народного Комиссариата путей сообщения, 1920. 209 с.

Романкевич Е.А. Геохимия органического вещества в океане. М.: Наука, 1977. 256 с.

Скопинцев Б.А. Органическое вещество в придонных водах. М., 1950. Вып. 17 (29). 290 с.

Соловьев М.М. Типы и распространение сапропелевых отложений в северной части БССР // Торф и его использование в народном хозяйстве. Минск, 1935. С. 135–143.

Флора и фауна водоемов и водотоков Байкальского заповедника. Вып. 92. М., 2001. 82 с.

Харвей Х.В. Современные успехи химии и биологии моря. М.: ИЛ, 1948. 224 с.

Bogush A.A., Leonova G.A., Krivonogov S.K., Bobrov V.A., Tikhova V.D., Kondratyeva L.M., Kuzmina A.E., Maltsev A.E. Diagenetic transformation of sapropel from Lake Dukhovoe (East Baikal region, Russia) // Procedia Earth and Planetary Science. ELSEVIER. 2013. № 7. P. 81–84.

Krivonogov S.K., Yamamuro M., Takahara H., Kazansky A.Y., Klimin M.A., Bobrov V.A., Safonova I.Y., Phedorin M.A., Bortnikova S.B. An abrupt ecosystem change in Lake Beloe, southern Western Siberia: Palaeoclimate versus local environment // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2012. V. 331–332. P. 194–206.