



УДК 549.01:556.55(282.256.341)

АУТИГЕННОЕ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЕ В СОВРЕМЕННЫХ ОСАДКАХ ОЗ. БАЙКАЛ

О. Н. Злобина*, В. И. Москвин*, О. М. Хлыстов**

Приводятся результаты детальных литологических исследований осадков с поверхностного слоя дна на глубине 260–310 м в районе естественного нефтепроявления у м. Толстый оз. Байкал. Показано, что аутигенное минералообразование происходило вблизи флюидоподводящих каналов под влиянием гидротермальной деятельности в зоне выходов углеводородов и биохимической перекристаллизации глинистых минералов.

Ключевые слова: современные осадки берегового склона, струйные выходы углеводородов, гранулометрический и минеральный состав осадков, микроструктуры, аутигенное минералообразование.

AUTHIGENIC MINEROGENESIS IN MODERN SEDIMENTS OF THE BAIKAL LAKE

O. N. Zlobina, V. I. Moskvina, O. M. Khlystov

Results of detailed lithological studies of sediments from the bottom surface layer at a depth of 260–310 m in the area of natural oil show near Tolsty Cape in the Baikal Lake are given. It is shown that authigenic mineralogenesis took place near fluid supplying channels influenced by hydrothermal activity in the zone of hydrocarbon seepages and biochemical recrystallization of clay minerals.

Key words: modern sediments of coastal slope, fluidjet seepages of hydrocarbons, grain and mineral composition of sediments, microstructures, authigenic mineralogenesis.

За последние десять лет в рамках интеграционных проектов СО РАН были выполнены комплексные исследования нефтегазоносности оз. Байкал [3, 7–9, 13].

Детальное литологическое изучение донных отложений с поверхностного слоя на глубине 260–310 м произведено в районе естественного нефтепроявления у устья рек Большая и Малая Зеленовская, вблизи м. Толстый (рис. 1). Отбор осадков осуществлялся грунтовыми трубками, а также с помощью глубоководных обитаемых аппаратов (ГОО) «Мир». Последующие исследования включали в себя рентгенофлуоресцентный анализ осадка (РФА), рентгенографические анализы валовой пробы и глинистой фракции (< 0,002 мм), анализ форм железа (в вытяжке), серы и содержания CO₂, определение микроэлементов методом атомной абсорбционной спектроскопии, изучение минералообразования с помощью сканирующей электронной микроскопии, гранулометрический анализ на приборе Microtrac 9370/3000 Series ASVR (Automated Small Volume Recirculator).

Из придонного слоя воды и с поверхности осадка сотрудниками Лимнологического института СО РАН (Иркутск) отбирались пробы для детекции живых микроорганизмов и их морфологического разнообразия методами эпифлуоресцентной и сканирующей микроскопии. Определено, что численность микроорганизмов различных физиологических групп в придонном слое воды и в водной толще районов нефтегазопроявлений в 10–

* ИНГГ СО РАН (Новосибирск), ** Лимнологический институт ИркНЦ СО РАН (Иркутск)

100 раз превышает их количество на участках вне указанных зон, где она составляет всего несколько клеток на один миллилитр [10, 12]. Максимальные концентрации всех исследованных групп бактерий приурочены к поверхностному слою донных

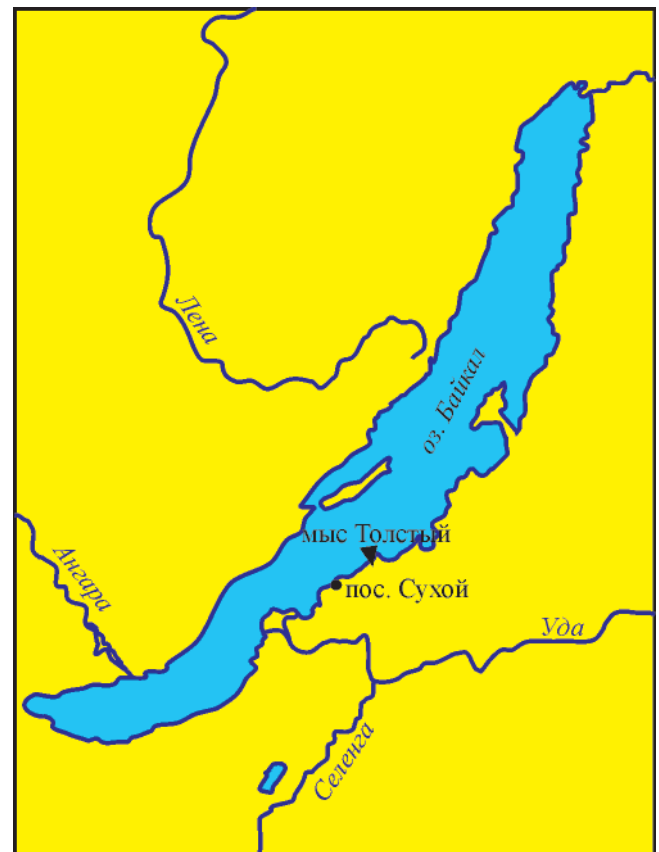


Рис. 1. Схема района исследований



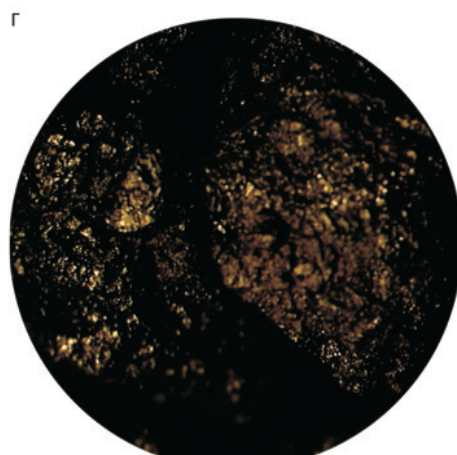
St-13, глубина 296 м



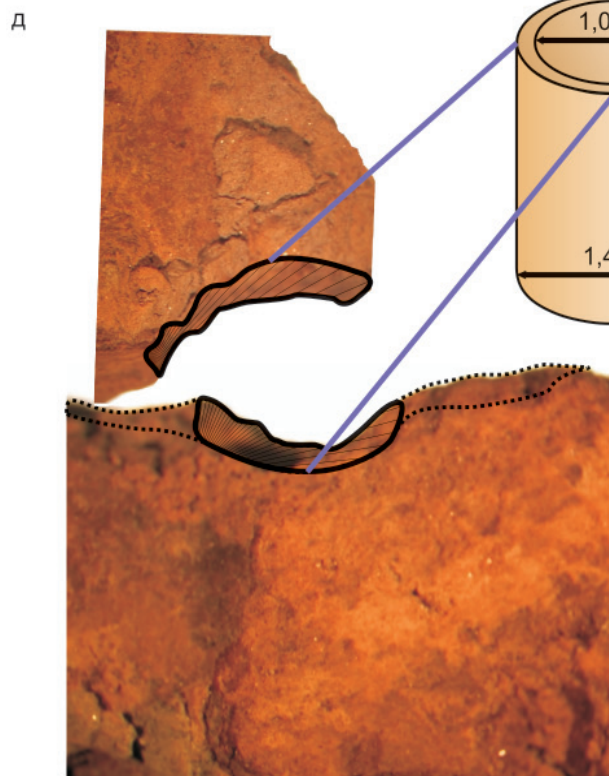
St-7, глубина 280 м



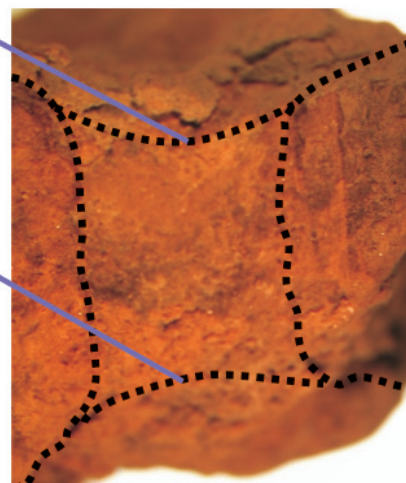
Б-1, глубина 310 м



St-24, глубина 900 м



Отверстие устьевое канала на поверхности наслоения (образец Б-1)



Выемка от цилиндра в вертикальном разрезе

Рис. 2. Донные осадки озера Байкал: а – берегового склона вне областей влияния струйных выходов углеводородов; б – берегового склона пограничных областей; в – вертикальный срез из зоны выходов метана; г – осадки из зоны высачивания нефти; д – устьевая часть флюидоподводящего канала



образований (0–20 см). Основную массу культивируемого микробного сообщества составляют микроорганизмы, окисляющие нефть или метан (УВОМ). Установлено также, что численность микроорганизмов, анаэробно окисляющих углеводороды, на два порядка ниже, чем аэробных УВОМ. Какой-либо закономерности в распределении анаэробных УВОМ в осадке по мере погружения не обнаружено.

Полученные литологические и геохимические данные свидетельствуют о том, что осадки берегового склона, формирующиеся в озере за счет поступления терригенного материала, значительно преобразуются в областях струйных выходов углеводородов. Это дает возможность выделить среди них по крайней мере два литологических типа отложений, сформированных: 1) на площадях вне зоны влияния нефтегазопроявлений (основной тип), 2) на участках выходов углеводородов (второй тип). Отложения берегового склона пограничных областей определяются только по геохимическим данным (рис. 2).

К *первому типу* относятся фации склоновой седиментации, которая полностью контролируется стоком минеральных веществ с суши. Это илы глинисто-алевритовые светло-серые, коричнево-серые (в сухом состоянии) до темно-серых, буроватых (в мокром), с включениями мелкого и тонкого углефицированного растительного детрита (см. рис. 2а, 2б). Структура осадков крупнопелито-алевритовая, обломочно-чешуйчатая. Распределение частиц по фракциям (мм) гранулометрического спектра следующее (рис. 3а, 3б):

< 1	< 1 %;
1–0,5	до 1,5 %;
0,5–0,25	1,8–2,8 %;
0,25–0,1	6,9–10,5 %.

Алевритовые фракции преобладают: 11,7–17,9 % зерен во фракции 0,1–0,05 мм и 41,6–37,9 % во фракции 0,05–0,01 мм. Во фракциях < 0,01 мм зафиксировано 35,5–31,9 % зерен. По взаимоотношениям частиц структура неконформно-зернистая, фрагментами конформно-чешуйчатая. В составе алевритовых фракций преобладают обломки хлорит-гидрослюдистых сланцев (58–64 %) и вытянутые лентообразные изогнутые чешуйки хлорита (15–25 %), реже отмечаются изометричные пластинки мусковита (6–15 %), обломки кварца (8–16 %) и полевых шпатов (2–5 %). В минеральном составе псаммитовых фракций содержание обломков кварца увеличивается до 35–50 %, полевых шпатов (калиевые разновидности и альбит) – до 15–30 %, количество зерен хлорит-гидрослюдистых сланцев уменьшается до 20–30 %, присутствуют обломки амфибола (первые проценты), в единичных количествах кварцита, риолиты. Наблюдаются акцессорные минералы: гранаты (марганцевые разновидности), апатит. Минеральный состав псефитовой фракции (> 1 мм) аналогичен описанному выше.

Зерна кварца изометричной, иногда пирамидальной формы, полуокатанные. Калиевые полевые шпаты преимущественно округленно-четыреугольной формы, отмечаются поверхности скола по плоскостям спайности. По результатам рентгенографического анализа в составе глинистого вещества в осадках преобладает слюда политипа 2M₁ (35–40 %), несколько меньше Mg-Fe хлорита (30 %), заметно меньше иллит-сметита (20–25 %), каолинита (10–15 %). Из минералов-примесей отмечаются в следовых количествах доломит и Mn-гранат (см. таблицу). Глинистая фракция (< 0,002 мм) имеет аналогичный фазовый состав. Характерная особенность всех образцов – наличие во фракции < 0,05 мм скелетных остатков прозрачного, стекловидного облика в виде тонких вытянутых игл и трубочек с серией концентрических ребер на внешней стенке. В породах отмечается низкое содержание минеральной серы.

Осадки *второго типа* представлены илами глинисто-алевритовыми коричнево-серыми, коричневыми (в сухом состоянии) и красно-коричневыми (в мокром). В вертикальном срезе донной пробы отчетливо прослеживается частая неравномерная тонкая слойчатость, обусловленная чередованием слоев красно-коричневых глинисто-гидрогетитовых (частицы пелитовой размерности); серовато-коричневых глинисто-гидрогетит-кварцевых (частицы пелито-мелкоалевритовой размерности); линзовидных темно-коричневых с нечеткими контурами, обогащенных марганцем (см. рис. 2в). В образце Б-1, отобранном с помощью ГОА «Мир», в процессе сушки отделился фрагмент цилиндрической формы (ось цилиндра диаметром до 1,4 см перпендикулярна слойчатости), который, вероятно, является устьевой частью флюидоподводящего канала (см. рис. 2д). Для дальнейшего изучения необходимо было идентифицировать пробы как современные донные отложения. Определяющим критерием послужили данные гранулометрического анализа. Анализ гистограмм распределения по 30 фракциям позволил установить сходный гранулометрический состав отложений первого и второго литотипов, формирующихся практически на одинаковых глубинах (см. рис. 3). Кроме того, гранулометрический спектр осадков второго типа оказался наиболее приближенным к классическому распределению. Таким образом, в осадках из зоны выходов УВ фракция > 1 мм не выделяется; 1–0,5 мм – < 1 %; 0,5–0,25 мм – 1–2 %; 0,25–0,1 мм – 8,6 %; 0,1–0,05 мм – 14,6 %; преобладает фракция 0,05–0,01 мм – 37,8 %; несколько меньше фракции < 0,01 мм – 36,6 %.

Значительные различия наблюдаются в минеральном составе. Красно-коричневая окраска породы связана с наличием гидрогетита, содержание которого, согласно пересчетам результатов РФА по методике Розена, 33,6 %. Основная фаза представлена кварцем (56,9 %), на долю полевых шпатов приходится не более 2 %, столько же ру-

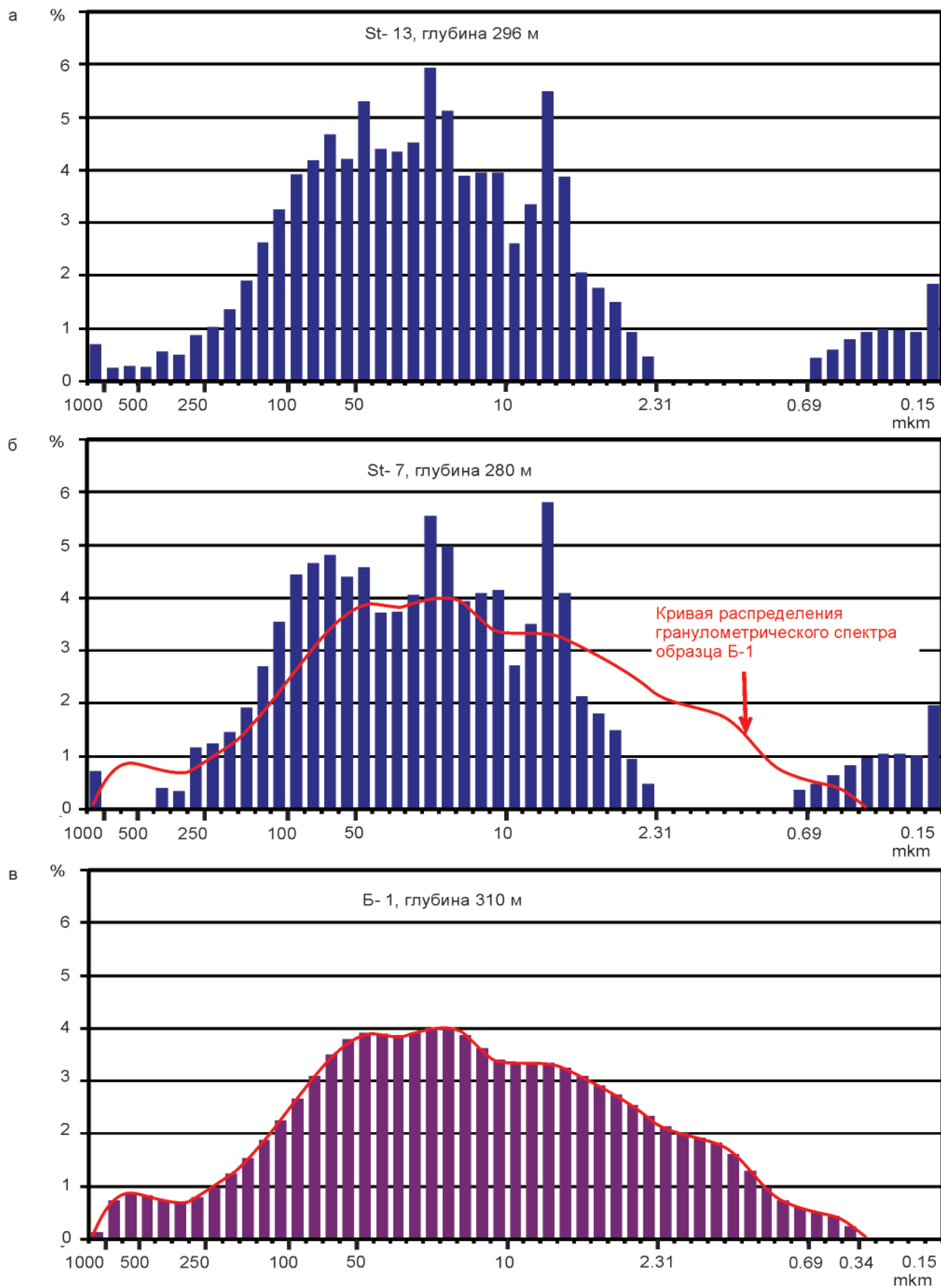


Рис. 3. Гистограммы распределения гранулометрических фракций донных осадков оз. Байкал: а – осадки берегового склона вне областей влияния струйных выходов углеводородов; б – осадки берегового склона пограничных областей; в – осадки из зоны выходов метана



Результаты рентгенографического анализа валовых проб донных осадков оз. Байкал

Тип осадков	Основная фаза	Терригенная примесь	Содержание глинистых минералов, %					Аутигенная примесь				
			Каолинит	Fe-гидрохлорит	Слюда 2M ₁	Вермикулит	Иллит-сметтит	Галит	Пирит	Сидерит	Ангидрит	Mn-минерал
Склоновой седиментации вне сипов	Кварц, платиоклаз	Калиевый полевой шпат, амфибол	15	30	30–35	–	20–25	–	–	–	–	–
Пограничных областей			10	30	40	–	20	–	–	–	–	–
Из зоны выходов метана			< 5	15–25	30–40	5–15	5–15	Мало	Мало	Следы	Мало	Мало

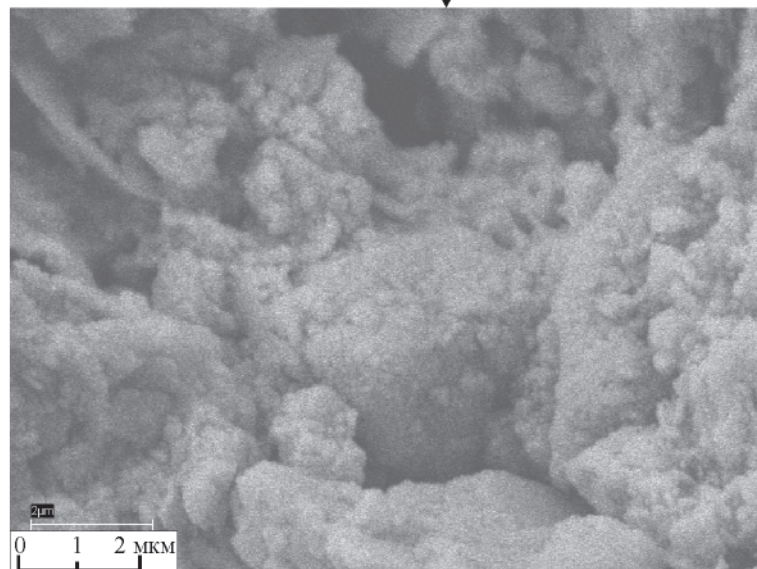
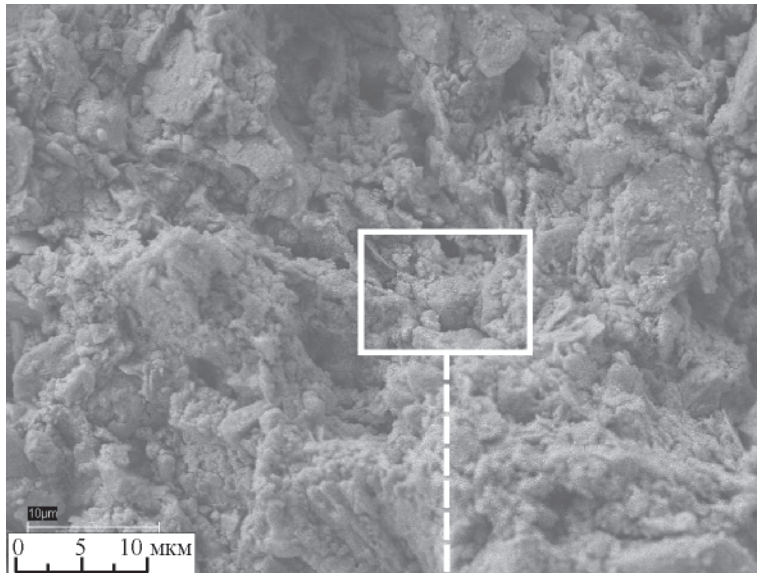
тила. В породах отмечается пирит (до 5 %). По мере удаления от флюидоподводящих каналов количество гидрогетита в донных осадках уменьшается до 12–14 % в пограничных областях.

Анализ микроэлементов методом атомной адсорбционной спектроскопии показал, что осадки второго типа насыщены марганцем в концент-

рации 3500 г/т, характерны повышенные содержания стронция (248 г/т) и бария (760 г/т). По данным рентгенографического анализа участки темно-коричневого цвета, обогащенные марганцем, сложены марганцовистым нсутином, тодорокитом и дюфренитом, а в светло-серых и голубоватых слоях присутствует вермикулит. В составе глинистых минералов преобладает слюда поли типа 2M₁ (30–40 %), количество Mg-Fe хлорита и иллит-сметтита уменьшается по сравнению с вышеописанными образцами (15–25 и 5–15 % соответственно), на долю каолинита приходится менее 5 %; в осадках появляется от 5 до 15 % вермикулита (см. таблицу). Состав аутигенных минералов примесей значительно шире: галит, ангидрит, сидерит, доломит, пирит. Вероятно, струйные выходы УВ на дне оз. Байкал сопровождаются гидротермальными растворами различной минерализации, за счет которых количество железа, марганца и фосфора в отложениях увеличивается в 2, 4 и 3 раза соответственно.

Для определения характера аутигенного минералообразования образцы были изучены с помощью сканирующего электронного микроскопа. Установлено, что осадки имеют неоднородную ультрамикроструктуру (рис. 4, 5). Скопления пелито-алевритовых частиц кварца, полевых шпатов и рутила формируют скелетную микроструктуру. Чешуйки глинистого состава распределены неравномерно, не создают сплошной матрицы, участками образуют ячеистую микроструктуру. На слюдистых и глинистых пластинках формируются глинисто-гидрогетитовые рубашки (рис. 6), состоящие из множества

Рис. 4. Неоднородная ультрамикроструктура пелитовых осадков оз. Байкал в зоне выходов метана. На выделенном фрагменте при большем увеличении (нижняя часть рисунка) наблюдается глобулярная микроструктура, образованная слипанием разноразмерных комочков





комочков, схожих с биоморфными формами, описанными в работах [1, 14]. Разноразмерные комочки слабокристаллизованных соединений железа и глинистых частиц стягиваются в агрегаты и образуют глобулярную микроструктуру.

Анализ гранулометрического и минерального состава отложений позволяет предполагать, что образование гидрогетита происходило за счет перекристаллизации обломков хлорит-гидрослюдистых сланцев с привнесом железа. Кривая распределения гранулометрического состава образца Б-1 (из зоны выходов метана), перенесенная на гистограмму распределения фракций осадков берегового склона пограничных областей, отсекает верхнюю сильно дифференцированную часть спектра (см. рис. 3б, 3в). В большей степени перекристаллизации подверглись обломочные зерна алеврито-псаммитовой размерности (> 10 мкм) и пелитовые фракции ($< 0,58-0,69$ мкм): объем первых уменьшился, а вторых увеличился. Рост доли крупнозернистых фракций (> 250 мкм) связан с образованием марганцевых сливных корочек и слипанием разноразмерных комочков, обога-

щенных железом. Отсутствие в спектре глинистых частиц с диаметром меньше $0,34$ мкм может свидетельствовать либо об их полном растворении, либо о перекристаллизации с увеличением объема. Необходимо отметить, что придонные воды оз. Байкал отличаются низкой минерализацией ($96,8-97,15$ мг/л). В областях струйных выходов углеводородов этот параметр имеет значения ниже фоновых на $0,03$ мг/л [10].

На рис. 5 (нижний снимок) представлена торцевая часть в значительной степени преобразованного обломка хлорит-гидрослюдистого сланца с реликтовой слоистой структурой. В обломке сохранились пластинки слюды мусковитового типа, а хлоритовые пакеты изменены с образованием ячеисто-волокнистой, комковатой ультрамикроструктуры, схожей с микроструктурами алюмосиликатов, подвергшихся бактериальному выщелачиванию [15]. Согласно экспериментальным исследованиям Л. К. Яхонтовой и В. П. Зверевой, наиболее высокая интенсивность биовыщелачивания наблюдается у шамозита (хлорита богатого Fe_2O_3) и глауконита – минералов, кристаллическая структура которых мало совершенна, а химический состав переменен. В результате бактериальной деятельности из шамозитов выщелачивается до 35% SiO_2 , при этом на их поверхности накапливается отрицательный заряд. В таких условиях окисление двухвалентного железа, поступающего в растворенном состоянии из флюидов, невозможно, однако, судя по аналитическим данным, осадки насыщены гидрогетитом. Низкотемпературные железомарганцевые гидротермальные образования широко распространены в современных океанических системах [2, 5]. Считается, что корки осаждаются из придонной морской воды, их состав регулируется гидротермальными растворами, генетически связанными с базальтовым и базальт-риолитовым вулканизмом срединно-океанических рифтов и задуговых бассейнов. Гидротермы, действующие на дне оз. Байкал в зоне выходов углеводородов, поступают из накопившейся в нем мощной (до 10 км) осадочной толщи мезокайнозойского возраста. Химический состав растворов, высачивающихся вместе с углеводородами, вероятно, в большей степени соответствует составу подземных грунтовых вод. Таким образом, в условиях низкой минерализации и температур ($3-4$ °С) двухвалентное растворимое железо

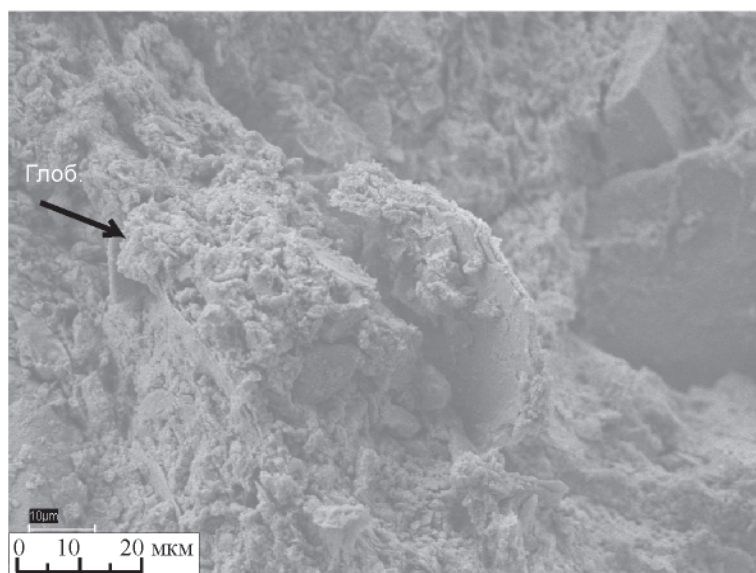
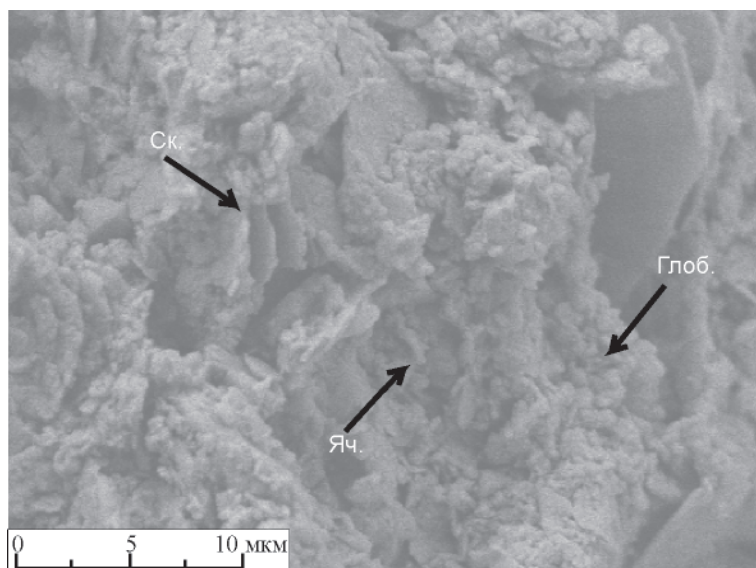


Рис. 5. Фрагменты ячеистой (Яч.), скелетной (Ск.) и глобулярной (Глоб.) микроструктур в алевропелитовых осадках оз. Байкал в зоне выходов метана. Глобулярная структура слагается колломорфными комочками биохемогенного генезиса



может перейти в трехвалентную форму и выпасть в осадок только при наличии достаточного количества окислителя. Ключевыми компонентами являются ионы водорода, образующиеся в избытке при аэробном окислении метана, в том числе метанотрофными организмами.

Предполагается, что бактериальная деструкция молекулы метана начинается с отторжения от нее атома водорода. Для этого организму необходимо накопить на себе отрицательный заряд, поэтому можно предполагать, что группы бактерий, разрушающих обломочный хлорит, с одной стороны, и молекулы метана – с другой, образуют специализированные сообщества. Первые в результате жизнедеятельности выщелачивают SiO_2 и подтягивают отрицательный заряд к поверхности алюмосиликатов; аналогичный заряд концентрируется и на коллоидах кремнезема. Вторые в процессе метаболизма, используя имеющийся потенциал, способствуют высвобождению ионов водорода, которые, в свою очередь, образуют в воде промежуточные перекисные соединения.

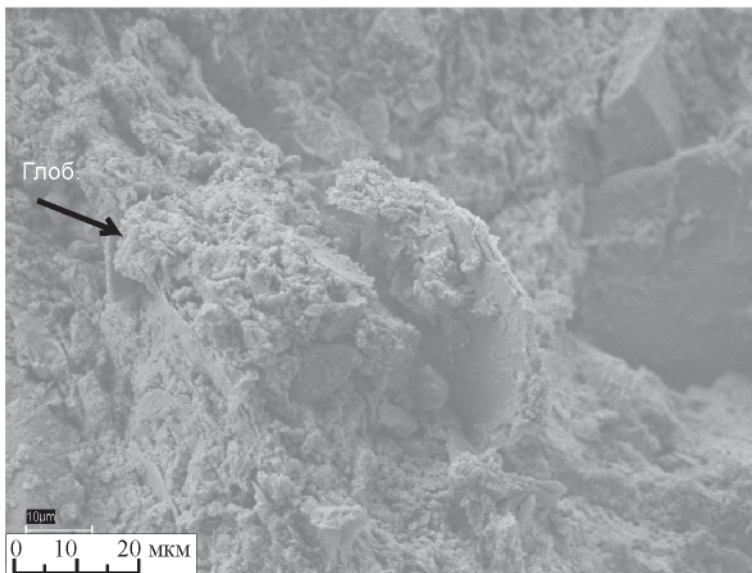
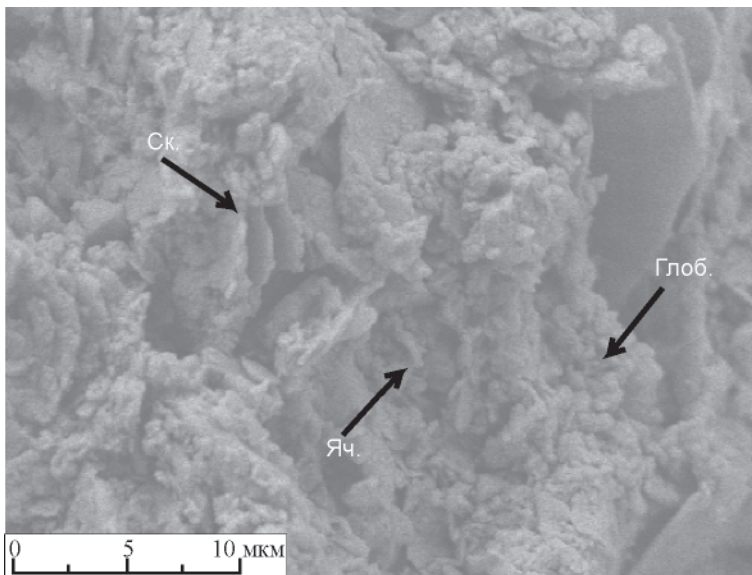
Достаточная концентрация последних приводит к осаждению растворенного железа. Кроме того, коллоиды кремнезема совместно с органическими флокулянтами также являются ускорителями хлопьеобразования. Таким образом, большая часть железа, высвободившегося после бактериального выщелачивания и привнесенного гидротермами, осаждается в виде глобул гидрогетита. Механизм образования марганцевых корочек, вероятно, аналогичен описанному.

Около 5 % железа, содержащегося в донных осадках на участках выходов метана, реализуется в сульфидной форме. В морских обстановках пирит формируется в зоне сульфатредукции, где сероводород реагирует с ионом железа [4, 6, 11]. В результате образуется моносульфид железа, который затем перекристаллизуется в пирит. Поверхностные осадки берегового склона оз. Байкал накапливаются в аэробных условиях. В них зафиксированы малые количества (0,06–0,20 %) минеральной серы и не превышающие кларковых значений содержания органического углерода (органическое вещество

террагенного генезиса, за исключением нефтепроявлений). Появление пирита в зоне метановых сипов, возможно, связано с эпизодическим подтоком сероводорода (по тем же флюидоподводящим каналам) и/или жизнедеятельностью микробных сообществ, способных извлекать серу из окружающей среды (минеральной взвеси, углефицированной органики) и концентрировать ее. Электронно-микроскопическое сканирование не выявило хорошо окристаллизованных выделений пирита; они представлены глобулами, инкрустирующими микроорганизмы (рис. 6).

Особый интерес среди аутигенных образований представляет вермикулит – минерал гидротермально-измененных пород. В большинстве случаев исследователи связывают его генезис с низкотемпературными преобразованиями биотита или флогопита, фиксируя в ассоциации с гидробиотитом, роговой обманкой, плагиоклазами, апатитом и др. В донных осадках оз. Байкал биотит и флогопит не отмечаются, а вермикулит концентрируется в частых тонких прослоях на участках выходов углеводородных флюидов (в осадках второго типа). Одинаково ориентированные псевдогексагональные пластинки аутигенного вермикулита располагаются среди скрытокристаллической массы, не замещая обломочных зерен (рис. 7). Наблюдается форма хорошо окристаллизованных выде-

Рис. 6. Глобулы пиритового состава, осажденные на поверхности микроорганизма (верхний снимок), и колломорфные сгустки глинисто-гидрогетитового состава, инкрустирующие обломок мусковита (нижний снимок)



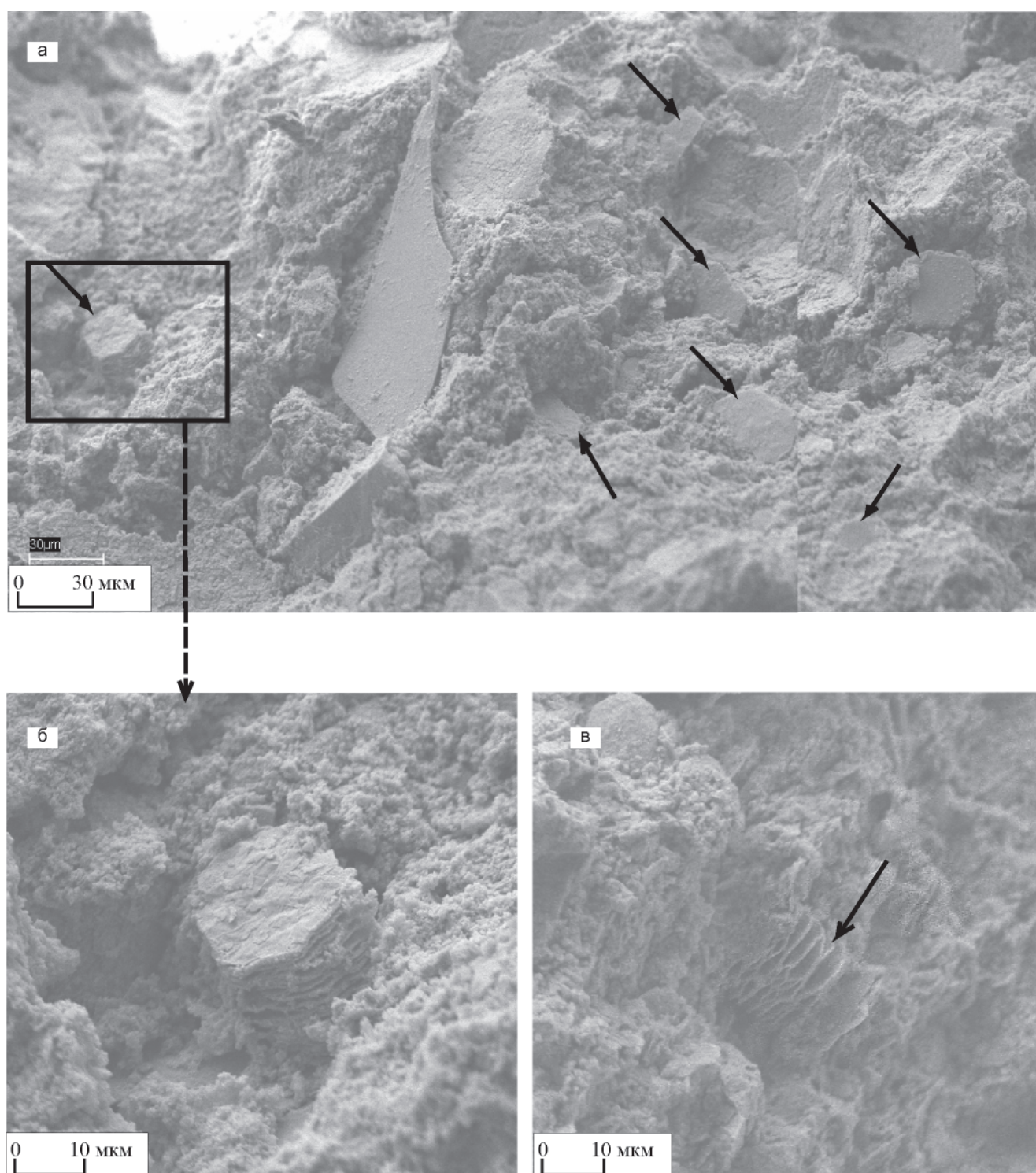


Рис. 7. Распределение аутигенных и обломочных зерен в алевропелитовых осадках оз. Байкал в зоне выходов метана: а – серия одинаково ориентированных псевдогексагональных пластинок аутигенного вермикулита (указаны стрелками); б – аутигенный вермикулит (форма в виде «столбика монет») среди скрытокристаллической массы; в – слоистая структура вермикулита (боковая поверхность)

лений в виде «столбика монет»; в основе ее кристаллической структуры лежат многочисленные листы из тетраэдров SiO_4 . Предполагается, что образование вермикулита происходило при насыщении среды осадконакопления кремнеземом, который выщелачивался микроорганизмами при разрушении обломочного хлорита.

Таким образом, аутигенное минералообразование в зоне выходов углеводородов на дне

оз. Байкал является результатом гидротермальной деятельности в сочетании с биохимическими процессами перекристаллизации глинистых минералов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Акритархи** в нижнекембрийских горячих сланцах куонамской свиты Сибирской платформы [Текст] / Е. А. Жегалло, А. Г. Замирайлова,



Ю. Н. Занин, Г. М. Писарева // Докл. РАН. – 1996. – Т. 347, № 1. – С. 69–71.

2. **Батури**н, Г. Н. Рудный потенциал океана [Текст] / Г. Н. Батури

н // Природа. – 2002. – № 5. – С. 20–30.

3. **Генетические** типы метана озера Байкал [Текст] / Г. В. Калмычков, А. В. Егоров, М. И. Кузьмин, О. М. Хлыстов // Докл. РАН. – 2006. – Т. 411, № 5. – С. 672–675.

4. **Гидротермальные** системы океана и жизнь [Текст] / А. Ю. Леин, Л. И. Москалев, Ю. А. Богданов, А. М. Сагалевич // Природа. – 2000. – № 5. – С. 47–55.

5. **Железомарганцевые** корковые образования Западно-Тихоокеанской переходной зоны [Текст] / Л. И. Аникеева, В. Е. Казакова, Г. М. Гавриленко, В. А. Рашидов // Вестн. КРАУНЦ; Науки о Земле. – 2008. – № 11. – С. 10–31.

6. **Логвина**, Е. А. Осаждение аутигенных минералов в отложениях углеводородных очагов разгрузки флюидов [Текст] / Е. А. Логвина // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы: Тез. Всерос. конф. – М.: ГЕОС, 2008. – С. 283–284.

7. **Нефть** в озере мирового наследия [Текст] / О. М. Хлыстов, А. Г. Горшков, А. В. Егоров [и др.] // Докл. РАН. – 2007. – Т. 414, № 5. – С. 656–659.

8. **Нефтегазоносность** отложений озера Байкал [Текст] / А. Э. Конторович, В. А. Каширцев, В. И. Москвин [и др.] // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48, № 12. – С. 1346–1356.

9. **Проблема** нефтегазоносности озера Байкал и Усть-Селенгинской впадины [Текст] /

А. Э. Конторович, В. И. Москвин, Л. М. Бурштейн, В. П. Данилова // Перспективы нефтегазоносности Байкала и Западного Забайкалья. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2003. – С. 84–89.

10. **Распределение** микроорганизмов в воде и донных осадках в районах естественных нефтепроявлений озера Байкал [Текст] / О. Н. Павлова, Т. И. Земская, А. Г. Горшков, Т. Я. Косторнова // Матер. III междунар. науч. конф. «Озерные экосистемы: Биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды». – Минск; Нарочь, 2007. – С. 242–243.

11. **Роль** анаэробных бактерий в экосистемах Черного моря [Текст] / М. В. Иванов, Н. В. Пименов, И. И. Русанов [и др.] // Природа. – 1998. – № 6. – С. 97–102.

12. **Сравнительная** характеристика микробного сообщества двух районов естественных нефтепроявлений [Текст] / О. Н. Павлова, Т. И. Земская, А. Г. Горшков, Т. Я. Косторнова // Матер. 2-го Байкальского микробиол. симп. с междунар. участием «Микроорганизмы в экосистемах озер, рек, водохранилищ». – Иркутск: Изд-во Инта географии СО РАН, 2007. – С. 186–187.

13. **Терпаны** нефтей озера Байкал [Текст] / В. А. Каширцев, А. Э. Конторович, В. И. Москвин [и др.] // Нефтехимия. – 2006. – № 4. – С. 1–9.

14. **Ультрамикроструктуры** фосфоритов (атлас фотографий) [Текст] / Ю. В. Миртов, Ю. Н. Занин [и др.]. – М.: Наука, 1987. – 224 с.

15. **Яхонтова**, Л. К. Основы минералогии гипергенеза: Учеб. пособие [Текст] / Л. К. Яхонтова [и др.]. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 331 с.