

УДК: 550.42:546.22:551.312.4(282.256.341)  
DOI: 10.52349/0869-7892\_2023\_94\_56-67

**В. А. Шахвердов, В. Ф. Сапега (ВСЕГЕИ)**

## **О ПЕРВОЙ НАХОДКЕ ЭЛЕМЕНТНОЙ СЕРЫ В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ОСАДКАХ ГИДРАТСОДЕРЖАЩЕЙ СТРУКТУРЫ P-2 («ПЕСЧАНКА») ОЗЕРА БАЙКАЛ**

Представлены результаты изучения аутигенных конкреций из поверхностных донных осадков Южной котловины озера Байкал. В гидратсодержащей структуре P-2 («Песчанка») в них впервые обнаружены выделения элементной серы. Предполагается, что ее образование в конкрециях является следствием неполного биогенного окисления сероводорода кислородом.

*Ключевые слова:* озеро Байкал, аутигенные конкреции, элементная сера.

**V. A. Shakhverdov, V. F. Sapega (VSEGEI)**

## **ON THE FIRST FINDING OF ELEMENTAL SULPHUR IN NEAR-SURFACE SEDIMENTS OF P-2 HYDRATE-BEARING STRUCTURE («PESCHANKA») LAKE BAIKAL**

Results of studying authigenic nodules from the surface bottom sediments in the Southern Basin of Lake Baikal are given. In the P-2 hydrate-bearing structure («Peschanka»), elemental sulphur was found in them for the first time. It is assumed that its formation in nodules is a consequence of incomplete biogenic oxidation of hydrogen sulphide by oxygen.

*Keywords:* Lake Baikal, authigenic nodules, elemental sulphur.

**Для цитирования:** Шахвердов В. А., Сапега В. Ф. О первой находке элементной серы в приповерхностных осадках гидратсодержащей структуры P-2 («Песчанка») озера Байкал // Региональная геология и металлогения. – 2023. – № 94. – С. 56–67. DOI: 10.52349/0869-7892\_2023\_94\_56-67.

**Введение.** В изучении минералогии донных отложений озера Байкал выделяются три основных направления. Первое связано с уникальностью озера, которая определяется его древним возрастом и непрерывностью геологического разреза. Такие особенности позволяют по составу минералов-индикаторов в разрезе осадков проследить глобальные палеоклиматические изменения в четвертичном периоде практически для всего северного полушария Земли. Наиболее информативными в этом отношении являются данные бурения в рамках проекта «Байкал-бурение» (1993–1999 гг.) [12; 17].

Второе направление минералогических исследований донных осадков озера Байкал заключается в определении источников сноса терригенного материала, стратиграфической корреляции и реконструкции условий седиментации [1; 11; 14; 15].

Третье направление – это изучение процессов диагенеза, с которыми связано широкое распространение в отложениях окисленной зоны аутигенных минералов, таких как лимонит, гидрогетит, псиломелан и др. В восстановительной зоне встречаются гидротроилит, мельниковит, конкреции пирита (марказита) и вивианита [5]. Преимущественно с процессами диагенеза в отложениях озер опре-

деляется и широкое распространение аутигенных сидерита и родохрозита [16], а также и образование железомарганцевых конкреций [6; 20].

В то же время ряд исследователей приходят к выводу о возможной связи образования аутигенных минералов железа и марганца в донных осадках с гидротермальными процессами и выходами углеводородов [9]. Также авторы предполагают, что выходы метана могут сопровождаться подтоком сероводорода, признаком чего является присутствие в современных осадках пирита вблизи метановых сипов. Именно поэтому в последние годы наиболее детальные минералогические исследования посвящены изучению аутигенного минералообразования в современных осадках и роли в нем процессов природной миграции углеводородов. Так, в работах А. А. Крылова [13; 16; 20] показано, что образование карбонатов железа и марганца (сидерита и родохрозита) в приповерхностных отложениях может быть генетически связано с газогидратсодержащими структурами, такими как K-2, Маленький и Санкт-Петербург-2. При этом исследователями отмечается существенная роль бактериальной деятельности в минералообразовании [9; 13]. Этими обстоятельствами объясняется и наш интерес к изучению аутигенных конкреционных образований в поверхностных донных осадках озера Байкал.

**Материалы и методы.** Образцы аутигенных конкреций получены на трех станциях, расположенных в Южной котловине озера Байкал в результате исследований в 2017 и 2018 годах (рис. 1). Всего было отобрано шесть конкреций различной морфологии.

**Станция 17Б-50** расположена вблизи газовых сипов, которые сопровождают проявление газовых гидратов Голоустрое. Отбор керна произведен бентосной трубкой с глубины 500 м. Конкреции размером до 5 мм имеют форму отдельных зерен и сростков и расположены в 36 см от поверхности при общей длине керна 59 см. Отложения, из которых они выделены, представлены светло-серыми однородными пластичными глинами. На них с несогласием залегают серые алевропелиты мощностью около 25 см, с жидким бурым наилком на поверхности.

**Станция 18Б-1** расположена в пределах гидратсодержащей структуры Р-2 («Песчанка»). Отбор керна произведен 3-метровой гравитационной

трубой с глубины 820 м. Общая длина поднятого керна составила 2,9 м. Отложения имеют преимущественно алевропелитовый состав. Цвет серый, до темно-серого. Распределение окраски пятнистое. Практически по всему разрезу встречаются включения гидротроилита в разной степени концентрации. Участки осадка, обогащенные гидротроилитом, имеют цвет от темно-серого до черного. Аутигенные конкреции отобраны из четырех интервалов от 43 до 84 см (18Б-1ТБ-1), 145 см (18Б-1ТБ-2), 200 см (18Б-1ТБ-3), 210 см (18Б-1ТБ-4). В первом интервале они представлены в виде мелких (до 1 мм) включений, в то время, как в двух следующих случаях могут достигать 2–3 см и имеют форму двух типов: пластинчатую и веретенообразную. В последнем интервале конкреции имеют вид сростков неправильной формы, до 5 мм.

**Станция 18Б-54** расположена в пределах гидратсодержащей структуры «Кедровая». Отбор донного грунта произведен с помощью ковша

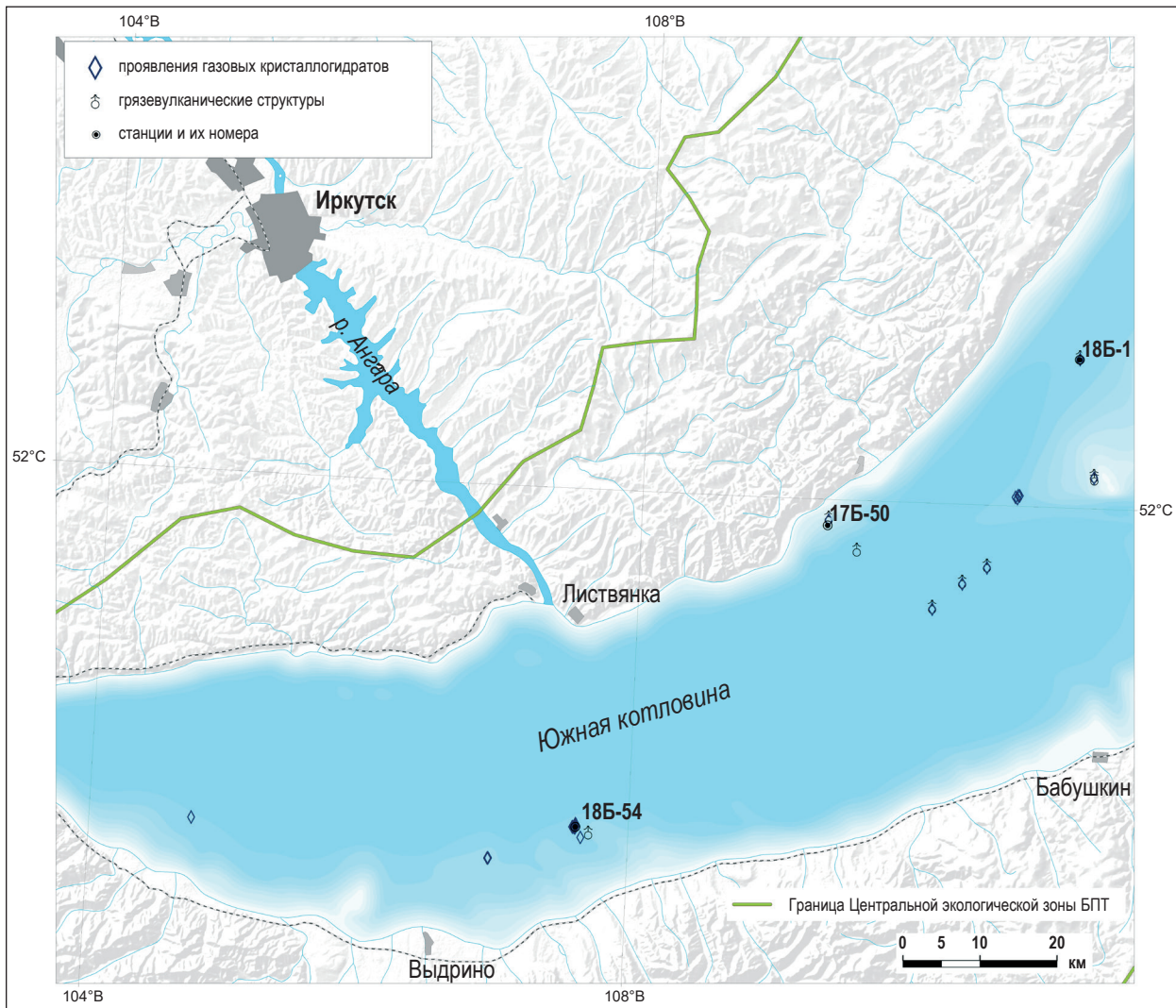
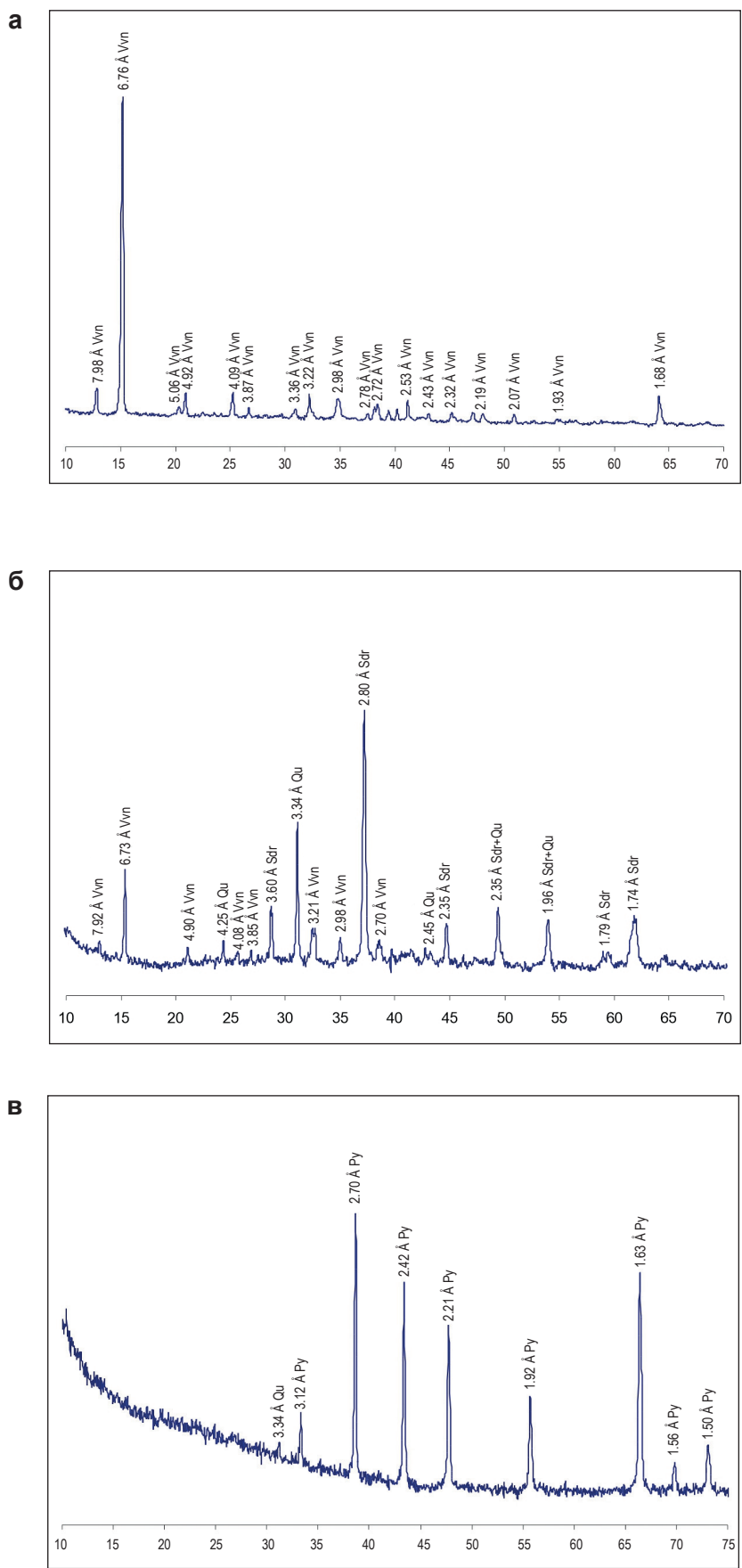


Рис. 1. Схема станций отбора конкреций



**Рис. 2. Дифрактограммы образцов:**  
 а – 18Б-1ТБ2; б – 18Б-54; в – 17Б-50ТБ  
 Условные обозначения: Qu – кварц, Sdr – сидерит, Vvn – вивианит

бокскорера и 3-метровой гравитационной трубы с глубины 600 м. В ковше осадок представлен серым текучепластичным газонасыщенным алевропелитом с высоким содержанием песчаного материала и включениями гидротроилита. Конкреции размером около  $1 \times 0,3 \times 0,3$  см расположены в нижней части разреза, вскрытого ковшем (13 см). В трубе грунт представлен серым алевропелитом с включениями гидротроилита. Грунт характеризуется обилием мелких разрывов, что связано с его высокой газонасыщенностью. В интервале 100–110 см и на забое, при общей длине поднятого керна 175 см, осадок содержит газовый гидрат зернистой и массивной текстуры. Конкреции размером до 8 мм отобраны из интервала 120–140 см.

Для определения минерального состава конкреций применялся метод рентгенофазового анализа, который был выполнен в лаборатории минералогических методов анализа (ЛММА) ФГБУ «ВСЕГЕИ». Материал исходных проб готовился в виде дезориентированных порошковых препаратов на стеклянной подложке. Съемка производилась на рентгеновском дифрактометре «ДРОН-6», оснащенный рентгеновской трубкой с кобальтовым анодом с длиной волны  $\lambda \approx 1,78892 \text{ \AA}$  при напряжении  $U = 35 \text{ kV}$  и силе тока  $I = 25 \text{ mA}$ . Обработка дифрактограмм производилась при помощи программного пакета PDWin-4 и международной картотеки JCPDS.

Для локального химического анализа применялись методы электронной микроскопии и микрозондовый анализ. Для этого изготавливались препараты проб на проводящем скотче, с последующим напылением углеродом.

Анализ производился на электронном микроскопе VEGA-3 производства фирмы «Tescan» (Чехия), оснащенный современным ЭДС детектором Ultimmax 100 фирмы «Oxford instruments» (Великобритания), обладающим высоким разрешением (до 10 нм) и позволяющим с высокой

точностью определить химический состав минералов в заданных участках минеральных зерен и их сростков.

**Результаты.** Рентгенофазовый анализ, который выполнялся с целью установления вещественного состава конкреций показал, что они являются преимущественно мономинеральными.

Основная масса образцов с номерами 18Б-1ТБ-2, 18Б-1ТБ-3, 18Б-1ТБ-4, 18Б-54, 18Б-54ТБ представлена вивианитом –  $(\text{Fe}^{2+})_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ . В качестве примера может быть приведена наиболее типичная дифрактограмма образца 18Б-1ТБ-2 (рис. 2, а). В то же время, на дифрактограмме образца, отобранного из ковша на ст. 18Б-54, фиксируются пики, указывающие на присутствие в пробе сидерита и кварца (рис. 2, б).

Конкреции, выделенные из глин на станции под номером 17Б-50, представлены пиритом (рис. 2, в).

Более разнообразная информация по минеральному составу конкреций была получена в результате электронно-микроскопического и микрозондового анализов.

Конкреция (образец 17Б-50ТБ) представляет собой сростание неправильной формы многочисленных разноразмерных (до 150 мкм) сферических образований пирита (рис. 3, а, б). В свою очередь, отдельные крупные сферы (рис. 3, б), являются конгломератом более мелких объектов – сростков кристаллов октаэдрической формы, что отражается в рельефе в виде бугров и «почек» разной высоты (рис. 3, б, в).

Микрозондовый анализ показал, что как сферические образования, так и отдельные кристаллы по химическому составу соответствуют стехиометрической формуле пирита (рис. 3; табл. 1, метки 1, 3, 5). В составе вмещающей породы основным компонентом, по-видимому, являются глинистые минералы группы иллита (рис. 3; табл. 1, метки 3, 5).

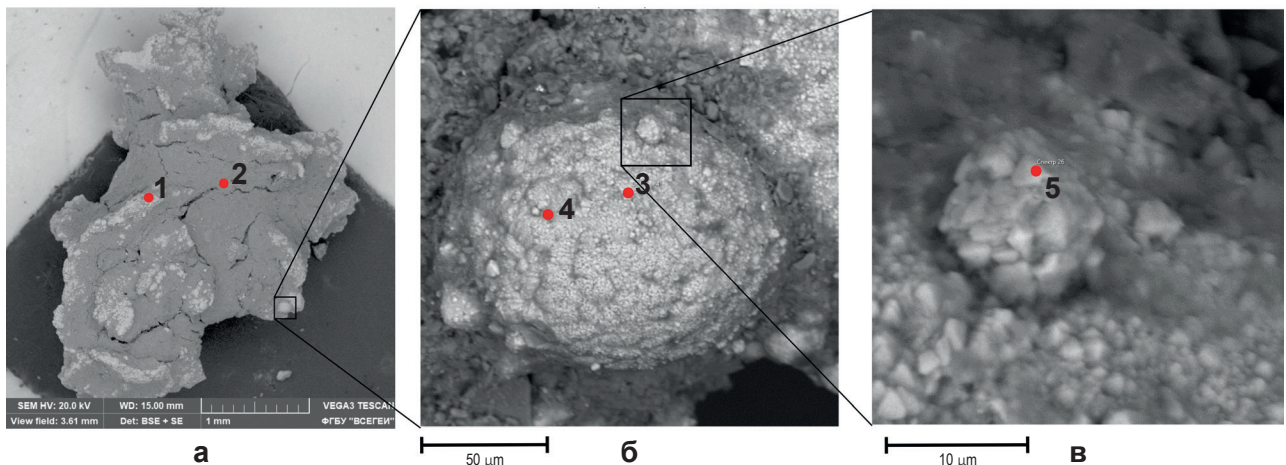


Рис. 3. Морфологические особенности конкреции и результаты микрозондового анализа образца 17Б-50ТБ

а – общий вид; б – отдельное крупное сферическое образование – увеличение в 1250 раз; в – «почка» на поверхности сферы – увеличение в 7170 раз (цифрами указаны метки определения химического состава, табл. 1)

Химический состав конкреции по данным микрозондового анализа, образец 17Б-50ТБ

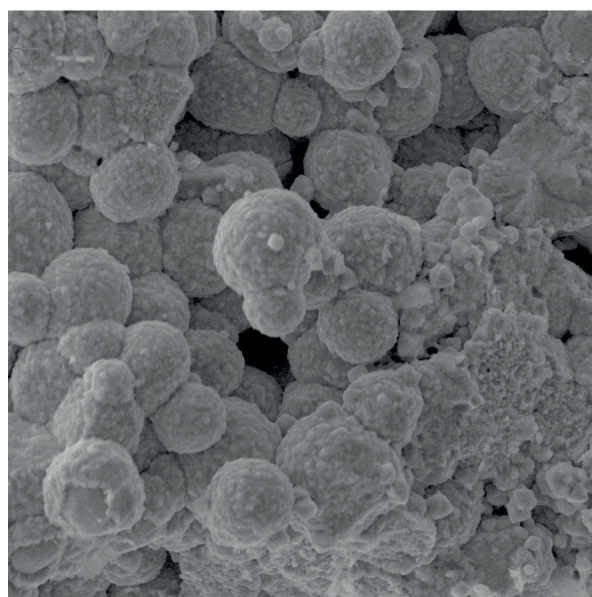
Метка	Атомные%											
	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe
1							67,2					32,8
2	65,09	0,28	0,83	4,73	19,54		4,36	1	0,31	0,19		3,68
3							65,24					34,76
4	64,41		0,55	3,74	27,3			0,7	0,19			3,1
5							67,35					32,65

Изучение поперечного скола образца показало, что конкреция представляет собой полифрамбонидный агрегат пирита (рис. 4,а). Размер отдельных сферических фрамбонидов составляет от 10 до 25 мкм. В местах их слияния наблюдается деформация правильной сферической формы. Сами фрамбониды образованы плотно упакованными, в разной степени упорядоченными скоплениями микрокристаллов пирита, размер которых не превышает 1 мкм (рис. 4,б).

Наиболее интересные данные были получены в результате электронно-микроскопических исследований конкреций со станции 18Б-1ТБ, которые проводились с целью получения более точной характеристики их химического и минералогического состава. Если анализ образцов конкреций под номерами 18Б-1ТБ-3 и 18Б-1ТБ-4 подтвердил их вивианитовый состав и только в отдельных точках были определены минералы группы гидрослюд и кварц, то для образца 18Б-1ТБ-2 были получены

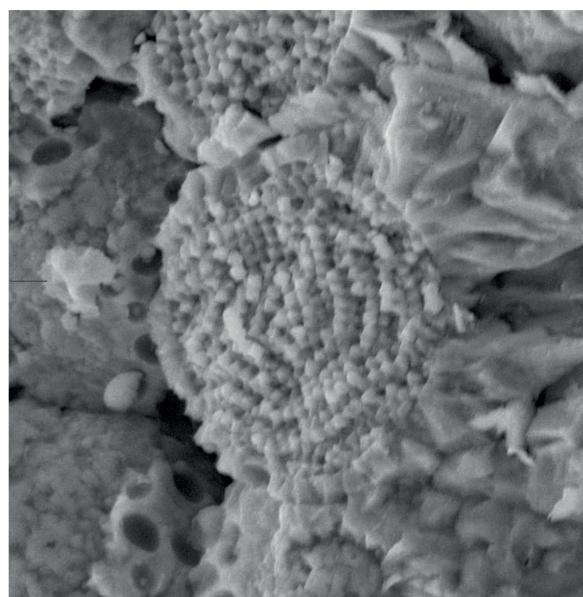
иные результаты. Как уже было отмечено выше, конкреции, встреченные в гравитационной трубе на глубине 145 см, по данным рентгенофазового анализа, имеют вивианитовый состав и представлены двумя морфологическими формами: пластинчатой и веретенообразной (рис. 5).

Анализ конкреции уплощенной пластинчатой формы показал, что ее поверхностный слой состоит из таблитчатых кристаллов вивианита (рис. 6,в) размером до 0,5 мкм, имеющих в поперечном сечении форму неправильного ромба (рис. 6,б). На кристаллах отчетливо видны мелкие трещины и сколы по спаянности (рис. 6,в). Промежуточное пространство между зернами заполнено однородной массой серого цвета. Микрозондовый анализ кристаллов подтвердил (рис. 6; табл. 2, метка 1), что их химический состав наиболее близок к вивианиту. Серая масса (рис. 6; табл. 2, метка 2), которая, видимо, является вмещающим конкрецию осадком, представляет собой тонко-



20 μm

а



10 μm

б

Рис. 4. Строение сферических образований из образца 17Б-50ТБ

а – увеличение в 1870 раз; б – увеличение в 5070 раз

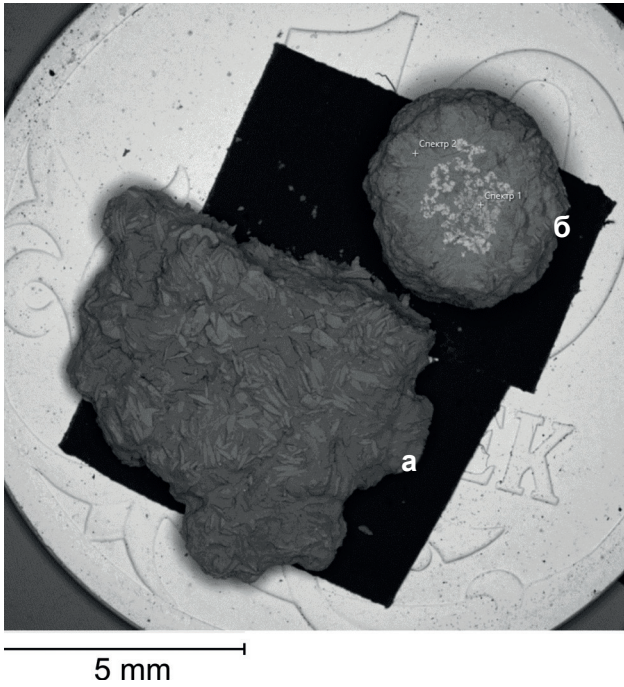


Рис. 5. Морфология конкреций образца 18Б-1ТБ-2  
а – плоская; б – веретенообразная (поперечное сечение)

дисперсные образования глинистых минералов группы иллита.

Существенно иную картину мы наблюдаем при анализе поперечного сечения конкреции веретенообразной формы. Если при рассмотрении его в мелком масштабе в краевой части определяется вивианит (рис. 7,а; табл. 3, метка 2), в катионной части которого, возможно, происходит частичное замещение железа другими катионами, то в центральной микрозондовый анализ показывает наличие гидратированного фосфата железа (рис. 7,а; табл. 3, метка 1). Сложного по химическому составу минерала, наиболее близкого к диадохиту –  $(\text{Fe}^{3+})_2(\text{PO}_4)(\text{SO}_4)(\text{OH}) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , являющемуся продуктом бактериального окисления дисульфида железа и фосфатов, на что указывает наличие в спектре как фосфора, так и серы (рис. 7; табл. 3, метка 1). На детальном участке из центральной части образца хорошо видны кристаллы вивианита таблитчатой формы (рис. 7,б; табл. 3, метка 5), которые образуют радиально лучистые агрегаты. Кроме того, в образце присутствуют хлопьевидные образования белесого цвета. Полученный в результате анализа химический состав этих образований позволяет предполагать, что это могут быть гидратированные

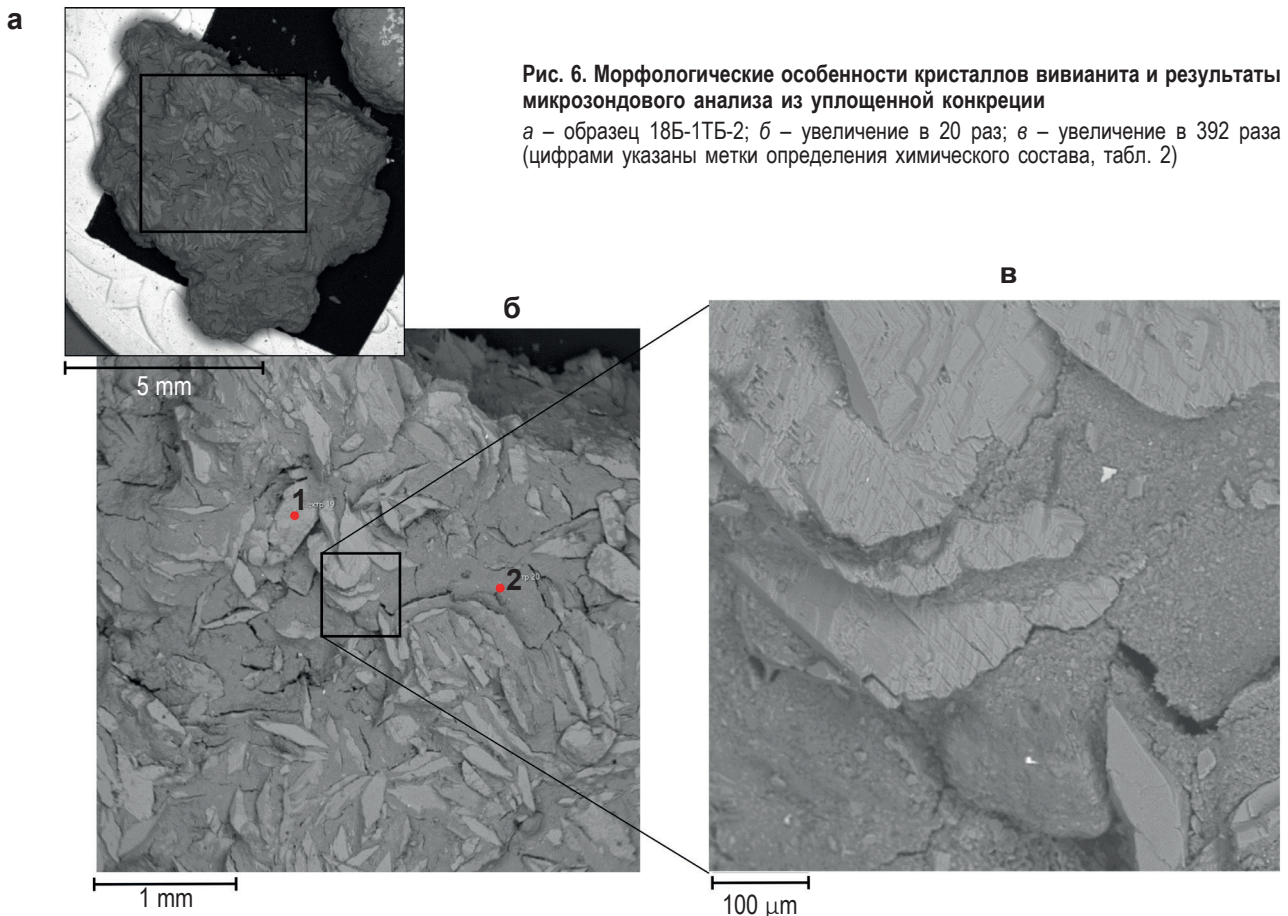


Рис. 6. Морфологические особенности кристаллов вивианита и результаты микрозондового анализа из уплощенной конкреции  
а – образец 18Б-1ТБ-2; б – увеличение в 20 раз; в – увеличение в 392 раза (цифрами указаны метки определения химического состава, табл. 2)

Таблица 2

Химический состав уплотненной конкреции образца 18Б-1ТБ-2 по данным микрозондового анализа

Атомные%												
Метка	O	Na	Mg	Al	Si	P	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Всего
1	61,63		0,37	0,71	0,99	9,9	0,07	0,11		3,51	22,71	100
2	60,44	1,04	1,6	9,01	20,76	0,12	2,48	0,46	0,3	0,07	3,71	100

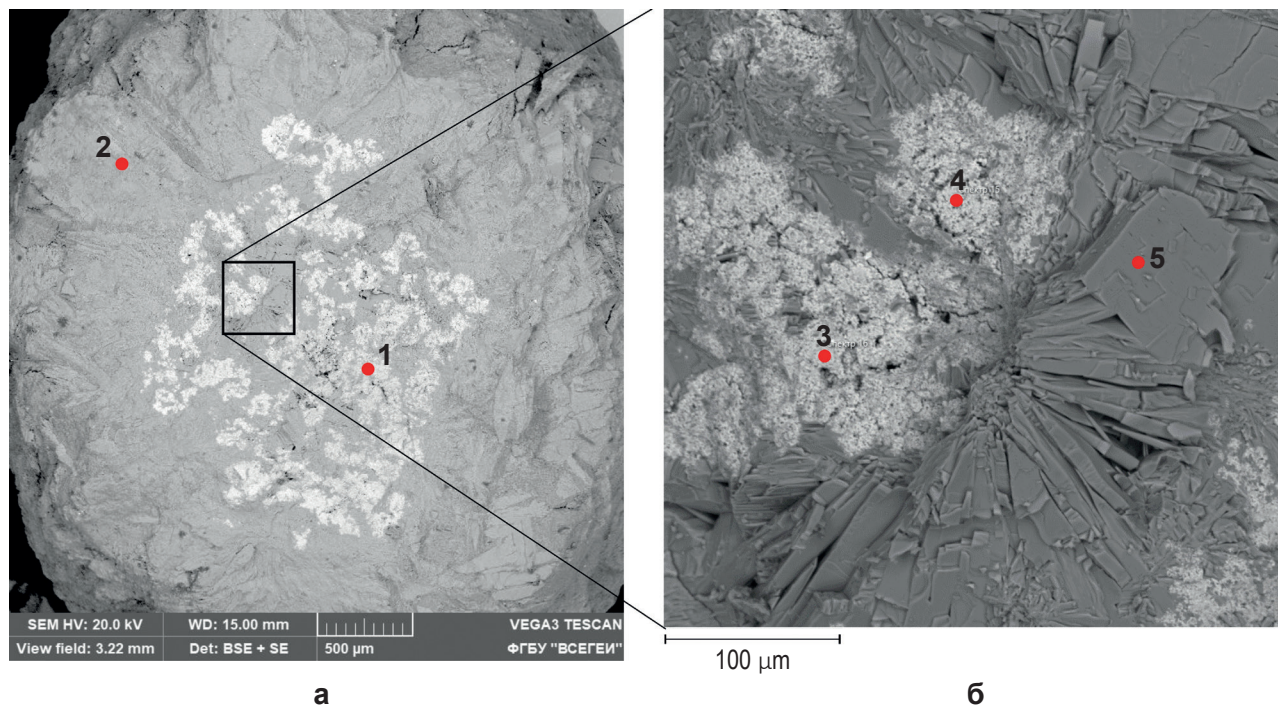


Рис. 7. Морфологические особенности и результаты микрозондового анализа минеральных образований из веретенообразной конкреции

а – образец 18Б-1ТБ-2; б – увеличение в 580 раз (цифрами указаны метки определения химического состава, табл. 3)

Таблица 3

Химический состав веретенообразной конкреции образца 18Б-1ТБ-2 по данным микрозондового анализа

Атомные %													
Метка	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Всего
1	64,06			0,35		5,38	11,24				1,01	17,96	100
2	70,83	0,91	0,85	3,45	5,93	6,72		0,42	0,21	0,1	1,26	9,32	100
3	67,1			0,15			17,06				0,06	15,62	100
4	65,31			0,24			15,25					19,21	100
5	66,34					12,25			0,08		3,81	17,52	100

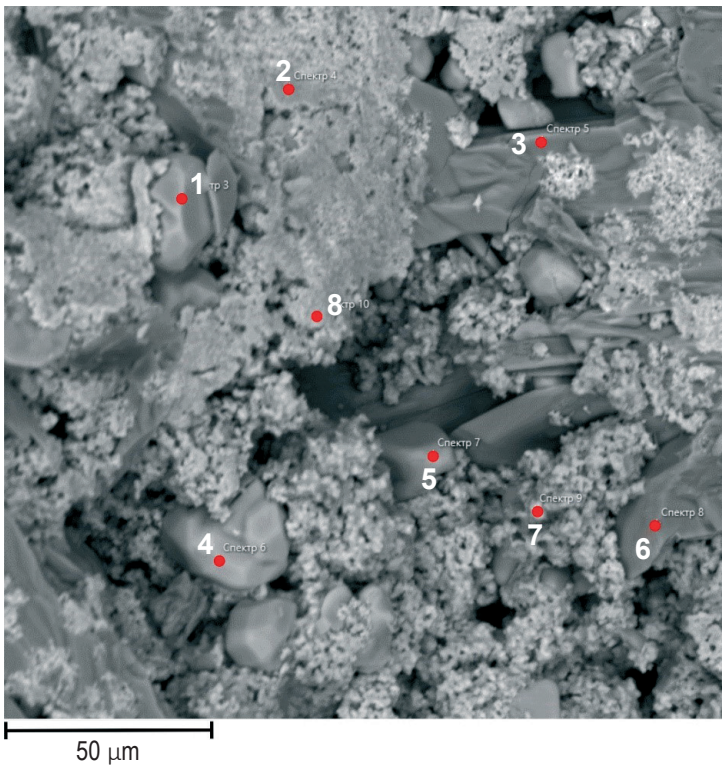


Рис. 8. Морфологические особенности и результаты микрозондового анализа минеральных образований из веретенообразной конкреции образца 18Б-1ТБ-2, увеличение в 1120 раз (цифрами указаны метки определения химического состава, табл. 4)

сульфаты железа (рис. 7,б; табл. 3, метки 3, 4). Наиболее близки по составу микасаит –  $(\text{Fe}^{3+}, \text{Al}^{3+})_2(\text{SO}_4)_3$  и его гидратированная форма кокимбит  $(\text{Fe}^{3+})_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ .

При значительном увеличении (в 1120 раз), помимо вивианита и сульфатов железа (рис. 8), уже идентифицированных на ранее изученных фрагментах конкреции, отмечаются изометрические, округлые, без резких ребер минеральные зерна светло-серого цвета. На данном фрагменте размер этих зерен колеблется от 10 до 15 мкм. Для трех из них (рис. 8; табл. 4, метки 1, 4, 5) выполнен микрозондовый анализ, который показал, что данные минеральные зерна представляют собой элементную серу.

Еще одной особенностью изученного образца оказалось присутствие в краевой части центрального ядра сферического образования диаметром около 30 мкм (рис. 9,б), инкрустированное мине-

ральными зернами. Они имеют форму октаэдра с несколько размытыми округлыми очертаниями и размер около 2 мкм. Результаты микрозондового анализа показали, что эти зерна являются микрокристаллами пирита (рис. 9; табл. 5, метка 1). Вероятно, данное сферическое образование является поперечным сечением фрамбоида, сформировавшегося в результате фоссилизации клетки сульфатредуцирующей бактерии.

**Обсуждение результатов.** В результате проведенных исследований в поверхностных осадках вблизи границы смены окислительных и восстановительных сред в конкрециях была обнаружена элементная сера. Наиболее вероятным механизмом появления серы в аутигенных конкрециях является её генерация в результате внутриклеточного окисления сероводорода до элементарной серы бесцветными серными бактериями. Такими

Таблица 4

Химический состав веретенообразной конкреции образца 18Б-1ТБ-2 по данным микрозондового анализа

Атомные %														
Метка	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	TI	Всего
1							96,36				0,27	3,37		100
2	65,97			0,35	0,25	0,39	6,96				0,15	25,94		100
3	75,96					9,2	0,95		0,04		1,3	12,55		100
4							98,61					1,39		100
5	9,9			0,21			86,65					2,21	1,02	100
6	58,09					11,93	1,33		0,07		3,03	25,55		100
7	64,98						0,31				0,07	23,35		100
8	51,33			0,39	0,19	0,37	12,05				0,07	35,6		100

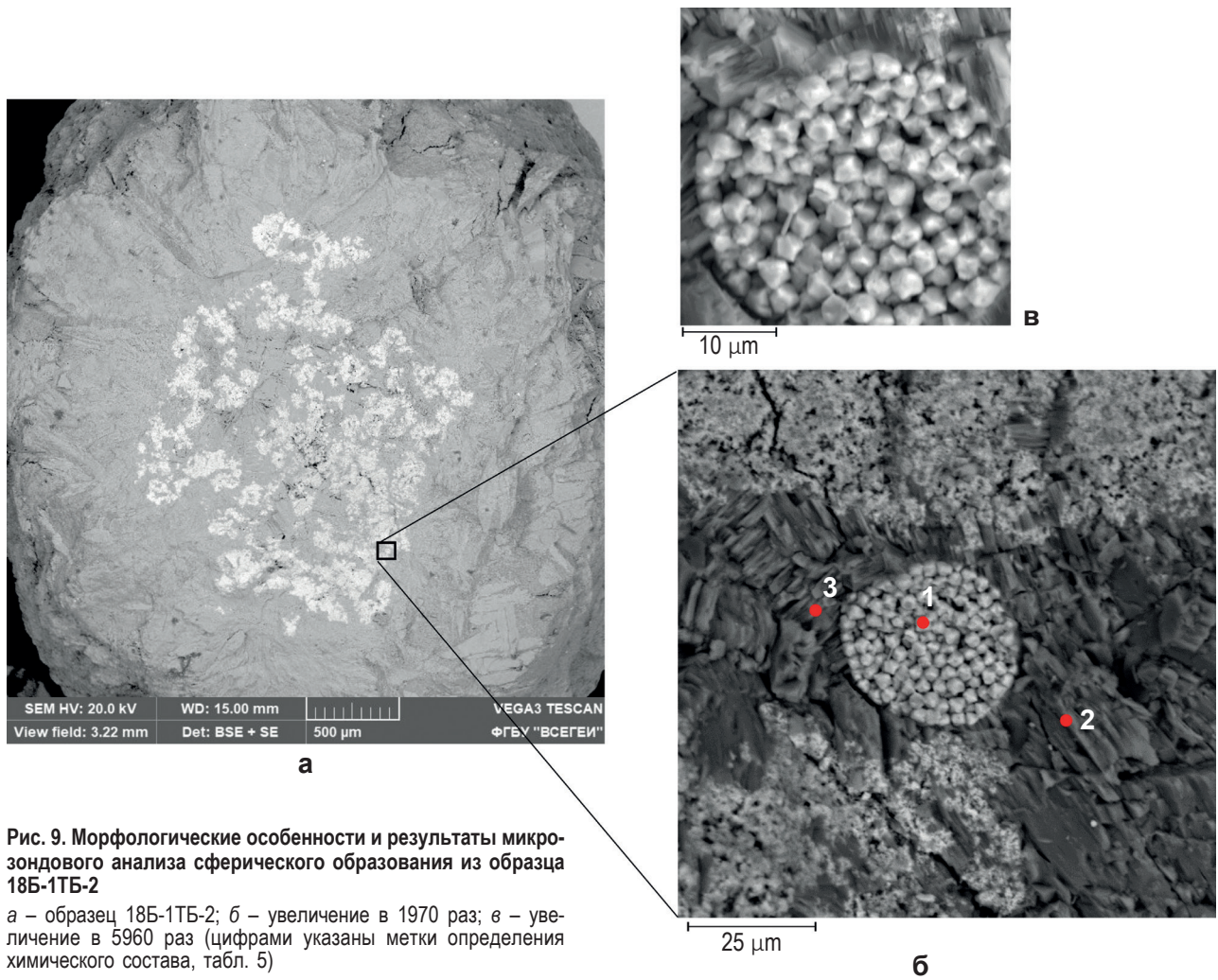


Рис. 9. Морфологические особенности и результаты микрозондового анализа сферического образования из образца 18Б-1ТБ-2

а – образец 18Б-1ТБ-2; б – увеличение в 1970 раз; в – увеличение в 5960 раз (цифрами указаны метки определения химического состава, табл. 5)

бактериями могут быть пресноводные многоклеточные (нитчатые) бактерии, относящиеся к родам *Beggiatoa* и *Thioploca*. Они способны к внутриклеточному накоплению серы в своей периплазме [4; 8; 10]. Образование внутриклеточных серных включений было открыто С. Н. Виноградским в 1887 г. Сера образуется в результате окисления сероводорода кислородом по следующей схеме:  $2H_2S + O_2 = 2H_2O + S_2$ . Конечным продуктом бактериального окисления соединений серы являются сульфаты:  $S_2 + 3O_2 + 2H_2O = 2H_2SO_4$ . Однако исследования показывают, что некоторые члены семейства *Beggiatoaceae* не обнаружива-

ют способности к окислению серы [7]. Это дает основания предполагать возможность нахождения элементной серы в минерализованных (минерально-замещенных) клетках бактерий. Кроме того, следует отметить еще один немаловажный факт, а именно накопление в клетке бактерии полифосфатов, что, на наш взгляд, объясняет совместное нахождение серы и вивианита в изученных конкрециях.

Как известно, представители семейства *Beggiatoaceae* обитают в местах выхода гидротермальных вод, бактериальных матах, активных илах на границе аэробных и анаэробных сред

Таблица 5

Химический состав веретенообразной конкреции образца 18Б-1ТБ-2 по данным микрозондового анализа

Метка	Атомные %									
	O	Mg	Al	Si	P	S	K	Mn	Fe	Всего
1						51,9		0,27	47,82	100
2	43,22	1,87	4,46	5,9	9,32	4,0	0,37	2,69	28,18	100
3	38,72				14,9	0,38		6,87	39,94	100

и могут встречаться на глубинах до 3000 м. Многими отмечается их существенная роль в циклах миграции углерода, серы, азота и фосфора. Установлены симбиозы серных бактерий с трубчатыми червями. В результате исследований, проводимых на озере Байкал специалистами ЛИН СО РАН, представители этого семейства неоднократно фиксировались в различных частях озера [3; 18; 19], что подтверждает высказанную нами точку зрения о возможном участии бактерий данного семейства в образовании серы. Приуроченность ареалов распространения серных бактерий к придонным выходам углеводородов (проявлениям газовых гидратов, метановым сипам, выходам нефти) и появление здесь элементной серы может быть объяснена тем, что активность всех микробиологических процессов резко возрастает в этих районах. В результате ряда биохимических преобразований (микробного метаноокисления и активизации сульфатредуцирующих бактерий) появляются восстановленные соединения серы, которые и служат питательной средой для развития серных бактерий.

**Заключение.** Элементарная сера в конкреционных образованиях на озере Байкал обнаружена впервые. Её накопление в конкрециях может являться следствием неполного биогенного окисления сероводорода кислородом. Сера откладывается в виде гранул в протоплазме клеток серных бактерий, которые участвуют в этих процессах. Роль в них объектов миграции углеводородов или генетическая связь серы с ними в настоящее время недостаточно ясна, так как элементарная сера в конкрециях обнаружена на озере Байкал только в единственной гидратсодержащей структуре Р-2 («Песчанка»).

В результате проведения электронно-микроскопических исследований конкреций в них обнаружены фромбоидальные выделения пирита. Причем не только в собственно пиритовых конкрециях, но и в конкрециях вивианитового состава. Фромбоидальный пирит в осадках озера Байкал, по-видимому, имеет бактериальную природу, на что указывают фрагменты оболочки клеток, которые наблюдаются на поверхности сферических выделений пирита. Биологическое происхождение подобных структур подтверждено и лабораторными исследованиями, так как при температурах ниже 25 °С фромбоиды пирита в ходе проведения эксперимента не образовывались [2].

Характер внутренней структуры фромбоидов указывает на сравнительную молодость и раннюю стадию процессов диагенеза донных осадков, вмещающих конкреции.

Полученные данные подтверждают предположение о том, что некоторые виды сульфатредуцирующих бактерий могут проявлять азотолерантные свойства и обитать в условиях наличия кислорода. Это позволяет одновременно сосуществовать в поверхностных донных осадках озера Байкал серным и сульфатредуцирующим бактериям и формировать совместные микроколонии

вблизи выходов углеводородов на дне, которые сопровождаются подтоком сероводорода, а также в связи с гидротермальными проявлениями.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулов Н. И., Мащук И. М. Акулова В. В. Плейстоценовые отложения оз. Байкал: вещественный состав и стратиграфическая корреляция // Стратиграфия, геологическая корреляция. – 2015. – Т. 23, № 1. – С. 100–120.
2. Астафьев М. М., Розанов А. Ю., Хувер Р. Фрамбоиды: их структура и происхождение // Палеонтологический журнал. – 2005. – № 5. – С. 1–7.
3. Бесцветные серные бактерии рода *Thioploca* из различных районов озера Байкал / Т. И. Земская, С. М. Черницына, Н. М. Дульцева, В. Н. Сергеева, Т. В. Погодаева, Б. Б. Намсараев // Микробиология. – 2009. – Т. 78, № 1. – С. 134–143.
4. Вольф И. В., Ткаченко Н. И. Химия и микробиология природных и сточных вод: учебное пособие / ред. М. Ф. Максимова. – Изд-во ЛГУ, 1973. – 238 с.
5. Голдырев Г. С. Диагенетические структуры, текстуры и аутигенные минералы донных отложений Байкала // Донные отложения Байкала. – М.: Наука, 1970. – С. 116–121.
6. Гранина Л. З., Мац В. Д., Федорин М. А. Железомарганцевые образования в регионе озера Байкал // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51, № 6. – С. 835–848.
7. Гуреева М. В., Грабович М. Ю. Экология микроорганизмов: учебное пособие. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2021. – 105 с.
8. Жук Н. П. Курс теории коррозии и защиты металлов. – М.: Металлургия, 1976. – 472 с.
9. Злобина О. Н., Москвин В. И., Хлыстов О. М. Аутигенное минералообразование в современных осадках оз. Байкал // Литология, петрография, минералогия, геохимия. – 2011. – № 4 (48). – С. 48–56.
10. Золотова Е. Ф., Асс Г. Ю. Очистка воды от железа, марганца, фтора и сероводорода. – М.: Стройиздат, 1975. – 176 с.
11. Источники сноса и состав донных осадков Южной котловины оз. Байкал (предварительные результаты) / Е. Г. Вологина, С. С. Воробьева, И. А. Калашникова, Т. С. Филева // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2009. – Т. 2, № 2. – С. 53–64.
12. Методы определения минерального состава донных осадков оз. Байкал и расчета их термодинамических параметров как критерия палеоклиматических изменений / А. В. Ощепкова, В. А. Бычинский, К. В. Чудненко, С. А. Сасим // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2019. – Т. 28. – С. 76–88.
13. Механизм формирования аутигенного родохрита в приповерхностных осадках газогидратоносной структуры Санкт-Петербург-2 в центральной котловине озера Байкал [Электронный ресурс] / А. А. Крылов, О. М. Хлыстов, А. Хачикубо, Х. Минами, Т. В. Погодаева, Т. И. Земская, М. Г. Кржижановская, Л. Э. Музафарова, Р. Ж. Атанязов // Нефтегазовая геология. Теория и практика. – 2017. – Т. 12, № 1. – URL: [https://doi.org/10.17353/2070-5379/8\\_2017](https://doi.org/10.17353/2070-5379/8_2017) (дата обращения: 12.05.2023).
14. Особенности осадконакопления в озере Байкал в голоцене / Е. Г. Вологина, М. Штурм, С. С. Воробьева, Л. З. Гранина, С. Ю. Тошаков // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44, № 5. – С. 407–421.
15. Реконструкция условий позднплейстоцен-голоценового осадконакопления в озере Байкал (на примере изучения колонки осадков, отобранной на подводной возвышенности в северном Байкале) / Е. Г. Вологина, М. Штурм, С. С. Воробьева, Н. Н. Ухова // Развитие жизни

в процессе абиотических изменений на Земле. – 2014. – № 3. – С. 331–335.

16. Формирование аутигенных карбонатов в грязевых вулканах озера Байкал / А. А. Крылов, О. М. Хлыстов, Т. И. Земская, Х. Минами, А. Хачикубо, Х. Шоджи, М. Кида, Т. П. Погодаева, Л. Наудтс, Д. Поорт // *Геохимия*. – 2008. – № 10. – С. 1051–1062.

17. Химический состав осадков глубоководных байкальских скважин как основа реконструкции изменений климата и окружающей среды / М. И. Кузьмин, В. А. Бычинский, Е. В. Кербер, А. В. Ощепкова, А. В. Орегляд, Е. В. Иванов // *Геология и геофизика*. – 2014. – Т. 55, № 1. – С. 3–22.

18. Экофизиологические особенности матообразующих бактерий Thioploca в донных осадках бухты Фролиха, Северный Байкал / Т. И. Земская, Б. Б. Намсараева, Н. М. Дульцева, Т. А. Ханаева, Л. П. Голобокова, Г. А. Дубинина, Л. Е. Дулов, Э. Вада // *Микробиология*. – 2001. – Т. 70. – С. 191–397.

19. Экспедиция на НИС «Г. Ю. Верещагин» с 22 июня по 01 июля 2021 года [Электронный ресурс] // ЛИИ СО РАН. – URL: <http://lin.irk.ru/expedition/1145-ekspeditsiya-na-nis-g-yu-vereshchagin-s-22-iyunya-po-01-iyulya-2021-goda> (дата обращения: 12.05.2023).

20. Authigenic rhodochrosite from a gas hydrate-bearing structure in Lake Baikal [Electronic resource] / A. A. Krylov, A. Hachikubo, H. Minami, T. V. Pogodaeva, T. I. Zemskaya, M. G. Krzhizhanovskaya, J. Poort, O. M. Khlystov // *International Journal of Earth Sciences*. – 2018. – Vol. 107. – Pp. 2011–2022. – URL: <https://doi.org/10.1007/s00531-018-1584-z> (12.05.2023).

21. New insights into the formation and burial of Fe/Mn accumulations in Lake Baikal sediments / L. M. Och, B. Müller, A. Voegelin, A. Ulrich, J. Göttlicher, R. Steiniger, S. Mangold, E. G. Vologina, M. Sturm // *Chemical Geology*. – 2012. – Pp. 244–259.

## REFERENCES

1. Akulov N. I., Mashchuk I. M. Akulova V. V. Pleystotsenovyе otlozheniya oz. Baykal: veshchestvennyy sostav i stratigraficheskaya korrelyatsiya. *Stratigrafiya, geologicheskaya korrelyatsiya*, 2015, vol. 23, no. 1, pp. 100–120.

2. Astaf'ev M. M., Rozanov A. Yu., Khuver R. Framboidy: ikh struktura i proiskhozhdenie. *Paleontologicheskii zhurnal*, 2005, no. 5, pp. 1–7.

3. Zemskaya T. I., Chernitsyna S. M., Dul'tseva N. M. et al. Bestsvetnye sernye bakterii roda Thioploca iz razlichnykh rayonov озера Байкал. *Mikrobiologiya*, 2009, vol. 78, no. 1, pp. 134–143.

4. Vol'f I. V., Tkachenko N. I. Khimiya i mikrobiologiya prirodnykh i stochnykh vod: uchebnoe posobie. Ed.: M. F. Maksimov. Izdatel'stvo Leningradskogo gosudarstvennogo universiteta, 1973, 238 p.

5. Goldyrev G. S. Diageneticheskie struktury, tekstury i autigennye mineraly donnykh otlozheniy Baykala. *Donnye otlozheniya Baykala*. Moscow, Nauka, 1970, pp. 116–121.

6. Granina L. Z., Mats V. D., Fedorin M. A. Zhelezomargantsevye obrazovaniya v regione озера Байкал. *Geology and geophysics*, 2010, vol. 51, no. 6, pp. 835–848.

7. Gureeva M. V., Grabovich M. Yu. Ekologiya mikroorganizmov: uchebnoe posobie. Voronezh, Izdatel'skiy dom Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta, 2021, 105 p.

8. Zhuk N. P. Kurs teorii korrozii i zashchity metallov. Moscow, Metallurgiya, 1976, 472 p.

9. Zlobina O. N., Moskvina V. I., Khlystov O. M. Autigennoe mineraloobrazovanie v sovremennykh osadkakh озера Байкал. *Litologiya, petrografiya, mineralogiya, geokhimiya*, 2011, no. 4 (48), pp. 48–56.

10. Zolotova E. F., Ass G. Yu. Ochistka vody ot zheleza, margantsa, ftora i serovodoroda. Moscow, Stroyizdat, 1975, 176 p.

11. Vologina E. G., Vorob'eva S. S., Kalashnikova I. A. et al. Istochniki snosa i sostav donnykh osadkov Yuzhnoy kotloviny озера Байкал (predvaritel'nye rezul'taty). *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Nauki o Zemle»*, 2009, vol. 2, no. 2, pp. 53–64.

12. Oshchepkova A. V., Bychinskiy V. A., Chudnenko K. V. et al. Metody opredeleniya mineral'nogo sostava donnykh osadkov озера Байкал i rascheta ikh termodinamicheskikh parametrov kak kriteriya paleoklimaticheskikh izmeneniy. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Nauki o Zemle»*, 2019, vol. 28, pp. 76–88.

13. Krylov A. A., Khlystov O. M., Khachikubo A. et al. Mekhanizm formirovaniya autigenного rodokhrozita v pri-poverkhnostnykh osadkakh gazogidratonosnoy struktury Sankt-Peterburg-2 v tsentral'noy kotlovine озера Байкал [Elektronnyy resurs]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika*, 2017, vol. 12, no. 1, URL: [https://doi.org/10.17353/2070-5379/8\\_2017](https://doi.org/10.17353/2070-5379/8_2017) (12.05.2023).

14. Vologina E. G., Shturm M., Vorob'eva S. S. et al. Osobennosti osadkonakopleniya v озере Байкал v golotsene. *Geology and geophysics*, 2003, vol. 44, no. 5, pp. 407–421.

15. Vologina E. G., Shturm M., Vorob'eva S. S. et al. Rekonstruktsiya usloviy pozdnepleystotsen-golotsenovogo osadkonakopleniya v озере Байкал (na primere izucheniya kolonki osadkov, otobrannoy na podvodnoy vozvyshenosti v severnom Baykale). *Razvitie zhizni v protsesse abioticheskikh izmeneniy na Zemle*, 2014, no. 3, pp. 331–335.

16. Krylov A. A., Khlystov O. M., Zemskaya T. I. et al. Formirovanie autigennykh karbonatov v gryazevykh vulkanakh озера Байкал. *Geochemistry*, 2008, no. 10, pp. 1051–1062.

17. Kuz'min M. I., Bychinskiy V. A., Kerber E. V. et al. Khimicheskii sostav osadkov glubokovodnykh baykal'skikh skvazhin kak osnova rekonstruktsii izmeneniy klimata i okruzhayushchey sredy. *Geology and geophysics*, 2014, vol. 55, no. 1, pp. 3–22.

18. Zemskaya T. I., Namsaraeva B. B., Dul'tseva N. M. et al. Ekofiziologicheskie osobennosti matoobrazuyushchikh bakteriy Thioploca v donnykh osadkakh бухты Фролиха, Северный Байкал. *Mikrobiologiya*, 2001, vol. 70, pp. 191–397.

19. Ekspeditsiya na NIS «G. Yu. Vereshchagin» s 22 iyunya po 01 iyulya 2021 goda [Elektronnyy resurs]. LIИ SO RAN, URL: <http://lin.irk.ru/expedition/1145-ekspeditsiya-na-nis-g-yu-vereshchagin-s-22-iyunya-po-01-iyulya-2021-goda> (20.05.2023).

20. Krylov A. A., Hachikubo A., Minami H. et al. Authigenic rhodochrosite from a gas hydrate-bearing structure in Lake Baikal. *International Journal of Earth Sciences*, 2018, vol. 107, pp. 2011–2022, URL: <https://doi.org/10.1007/s00531-018-1584-z> (12.05.2023).

21. Och L. M., Müller B., Voegelin A. et al. New insights into the formation and burial of Fe/Mn accumulations in Lake Baikal sediments. *Chemical Geology*, 2012, pp. 244–259.

Шахвердов Вадим Азимович – канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ. <Vadim\_Shakhverdov@vsegei.ru>

Сапега Владимир Федорович – канд. геол.-минерал. наук, зав. лабораторией, ВСЕГЕИ. <Vladimir\_Sapega@vsegei.ru>

*Shakhverdov Vadim Azimovich* – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, VSEGEI.  
<Vadim\_Shakhverdov@vsegei.ru>

*Sapega Vladimir Fedorovich* – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Laboratory, VSEGEI.  
<Vladimir\_Sapega@vsegei.ru>

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74,  
Санкт-Петербург, Россия, 199106.

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, Russia, 199106.