

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ, МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ И РЕНТГЕНСПЕКТРАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННО-ЗОНДОВОГО МИКРОАНАЛИЗА В ЭКОЛОГО-АНАЛИТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ. ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ СИНИХ МИКРОЧАСТИЦ НЕИЗВЕСТНОЙ ПРИРОДЫ, НАБЛЮДАЕМЫХ ВО ВЗВЕШЕННОМ ВЕЩЕСТВЕ ОЗЕРА БАЙКАЛ\*

О.Ю. Белозерова<sup>1</sup>, В.И. Егоров<sup>2</sup>, А.П. Чебыкин<sup>2</sup>, И.Б. Мизандронцев<sup>2</sup>,  
Т.А. Шишлянникова<sup>2</sup>, А.А. Никонова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация

### Информация о статье

Дата поступления  
4 октября 2019 г.

Дата принятия к печати  
10 декабря 2019 г.

Дата онлайн-размещения  
20 декабря 2019 г.

### Ключевые слова

Озеро Байкал; синие частицы; титан; электронная микроскопия; рентгеноспектральный анализ; масс-спектрометрия; проблемы современной экологии

### Аннотация

С апреля по июнь 2018 г. во взвешенном веществе воды оз. Байкал с глубин до 25 м в различной удаленности от берега (до 4 000 м) обнаружены твердые частицы синего цвета размером до 900 мкм неизвестной природы с максимальной численностью в прибрежной зоне, устойчивые к воздействию минеральных кислот и горению. Анализ методами электронной микроскопии с напылением проводящего слоя золота, полевой десорбции с индуктивно связанной плазмой (масс-спектрометрия) и рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа с изучением поверхности исследуемых объектов и распределения в них компонентов показал набор из 68 элементов, входящих в состав частиц. Наибольшее содержание отмечено для Ti, Ca и Si. Сравнительно высокое содержание найдено для тяжелых металлов: Zn, Pb, Sb, Nb, Cu, As. Сделаны предположения об антропогенной природе синих частиц — в форме продуктов спекания титана с сажистой фазой, а также в составе сорбентов на основе соединений титана и судовых красок.

## USE OF METHODS OF ELECTRONIC MICROSCOPY, MASS-SPECTROMETRY AND ROENTGENOSPECTRAL ELECTRONIC PROBE MICRO-ANALYZER IN ECOLOGICAL AND ANALYTICAL STUDIES. ELEMENTAL COMPOSITION OF BLUE MICRO-PARTICLES OF UNKNOWN NATURE OBSERVED IN SUSPENDED SUBSTANCE OF LAKE BAIKAL

Olga Yu. Belozerova<sup>1</sup>, Viktor I. Egorov<sup>2</sup>, Aleksandr P. Chebikin<sup>2</sup>, Igor B. Mizandrontsev<sup>2</sup>,  
Tatiana A. Shishlyannikova<sup>2</sup>, Alyona A. Nikonova<sup>2</sup>

<sup>1</sup> A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, the Russian Federation

<sup>2</sup> Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, the Russian Federation

### Article info

Received  
October 4, 2019

### Abstract

During the period from April till June, 2018, suspended substance of Baikal Lake water from depths up to 25 meters in various distance from the shore (up to 4,000 m) showed presence of hard particles of

\* Авторы выражают сердечную благодарность директору ЛИИ СО РАН доктору геолого-минералогических наук А.П. Федотову, академику РАН, доктору химических наук, профессору, главному научному сотруднику М.А. Грачеву и зав. отделом ультраструктуры клетки ЛИИ СО РАН доктору биологических наук, профессору Е.В. Лихошвай за ценные советы и предоставленное оборудование приборного центра коллективного пользования «Ультрамикрo-анализ», искреннюю благодарность директору Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН доктору геолого-минералогических наук А.Б. Перепелову за возможность анализа проб на оборудовании центра коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований». А.А. Никонова выражает благодарность И.Б. Мизандронцеву за направляющие советы и замечания, без которых вовсе не было бы этой работы.

Accepted  
December 10, 2019

Available online  
December 20, 2019

### Keywords

Lake Baikal; blue particles;  
electronic microscopy;  
roentgenospectral analysis, mass-  
spectrometry; problems  
of modern ecology

Озеро Байкал является крупнейшим в мире резервуаром сравнительно чистой пресной природной воды [1; 2], и такая чистота обусловлена многими особенностями уникальной, сложной и вместе с тем хрупкой экосистемы озера. Значительную роль в постоянной очистке и фильтрации байкальской воды принимают байкальские организмы, скрепляемые различными связями и взаимодействиями [2–5].

В 1916 г. началось планомерное исследование Байкала [6]. В 1996 г. озеро и примыкающая к нему территория включены в Список участков мирового природного наследия ЮНЕСКО [2]. В 1999 г. принят закон Российской Федерации «Об охране озера Байкал». В 2010 г. издан приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации «Об утверждении нормативов предельно допустимых воздействий на уникальную экологическую систему озера Байкал и перечня вредных веществ, в том числе веществ, относящихся к категориям особо опасных, высокоопасных, опасных и умеренно опасных для уникальной экологической системы озера Байкал» от 5 марта 2010 г. № 63<sup>1</sup>.

Несмотря на сравнительную чистоту вод Байкала относительно других водоемов мира, озеро подвергается антропогенному влиянию и изменению экосистемы, которое порой бывает различимо только с помощью высокоточных и чувствительных методов анализа<sup>2</sup>. Всеобъемлющий экологический мониторинг

<sup>1</sup> Об утверждении нормативов предельно допустимых воздействий на уникальную экологическую систему озера Байкал и перечня вредных веществ, в том числе веществ, относящихся к категориям особо опасных, высокоопасных, опасных и умеренно опасных для уникальной экологической системы озера Байкал : приказ Минприроды РФ от 5 марта 2010 г. № 63 // Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. 2010. № 26.

<sup>2</sup> Пресноводные экосистемы — современные вызовы : тез. докл. и стендовых сообщений междунар. конф., Иркутск, 10–14 сент. 2018 г. / Лимнол. ин-т СО РАН. Иркутск, 2018. 400 с.

blue color in size up to 900 mkm of unknown nature with maximum numbers at the nearshore zone, resistant to mineral acids and combustion. The analysis using methods of electronic microscopy with spray application of conducting golden coating, field desorption with inductively connected plasma (mass-spectroscopy) roentgenospectral electronic probe micro-analyzer, along with investigation of the surfaces of the objects studied and the components distributed in them, showed a set of 68 elements entering the composition of the particles. The major composition is marked for Ti, Ca and Si. Comparatively high composition is found for high-density metals: Zn, Pb, Sb, Nb, Cu, As. Suppositions are made about the anthropogenic nature of the blue particles — in forms of products of agglomerating titanium with fuliginous phase, as well as in composition of sorbents on the basis of compounding of titanium and ship paints.

экосистемы Байкала в условиях увеличивающейся антропогенной нагрузки на нее является важной задачей современной экологии. В этой связи целью нашей работы было исследование химического состава синих частиц неизвестной природы, найденных во взвешенном веществе байкальской воды (яркие синие вкрапления среди биомассы фитопланктона), с применением современных точных методов анализа и оценка вероятного техногенного влияния на экосистему оз. Байкал.

### Экспериментальная часть

*Отбор проб.* Взвешенное вещество байкальской воды, в частности фитопланктон, отбирали в апреле — мае 2018 г. в южной котловине оз. Байкал в различной удаленности от берега (от 25 до 4 000 м) сетью Джеди (размер ячейки — 100 мкм) с глубины 1,5–25,0 м. Во время ледостава пробы отбирали из майны на расстоянии 50 и 1 000 м от берега в районе устья р. Сенной (падь Сенная недалеко от пос. Листвянка), а также в конце мая, начале июня и в сентябре 2019 г. разово в разных точках озера. Пробы фильтровали через нейлоновые фильтры (размер ячейки — 40–60 мкм) на фильтр-аппарате, состоящем из воронки Бюхнера с приемной колбой на 1 000 мл (Duran Group, Германия). Из отфильтрованной массы стальной иглой отбирали твердые частицы размером до 500 мкм, синего цвета, различной формы, заметные невооруженным глазом либо с использованием увеличительных стекол (9,0 × 0,2). В лаборатории пробы фитопланктона и частиц хранили при –20 °С до анализа.

*Первичный анализ образцов методом электронной микроскопии.* Перед просмотром при помощи микроскопа найденных синих частиц проводили стандартную пробоподготовку с сушкой образцов и последующим напылением тонкого проводящего слоя золота. Первичный анализ образцов осуществляли методом электронной ми-

роскопии с использованием растрового электронного микроскопа Quanta 200 3D (FEI Company, США), укомплектованного энергодисперсионной приставкой рентгеновского микроанализа EDAX, с безазотным охлаждением GENESIS XM260-Imaging SEM with APPOLO 10 приборного центра «Электронная микроскопия» центра коллективного пользования «Ультрамикроданализ» (под руководством академика М.А. Грачева) Лимнологического института СО РАН.

Анализ элементного состава образцов методом полевой десорбции и масс-спектрометрии (МС) с индуктивно связанной плазмой (ИСП). Для исследования образцов методом МС-ИСП их ионизацию проводили путем полевой десорбции (выбивание лазером с использованием системы лазерной абляции New Wave UP213 Laser Ablation System (New Wave Research, Япония)). Условия ионизации: мощность лазера — 80 %, диаметр пучка — 55 мкм, время прожига — 10 с. Анализ образцов выполнен на оборудовании Agilent7500ce (Agilent, США) при следующих условиях: мощность плазмы — 1 500 Вт, поток несущего газа — 1,5 дм<sup>3</sup>/мин, метод сканирования — три точки на массу, время сканирования точки — 0,1 с.

Рентгеноспектральный электронно-зондовый микроанализ (РСМА). Исследования методом РСМА выполнены в центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (Иркутск), в лаборатории рентгеновских методов анализа, на рентгеноспектральном микроанализаторе Superprobe JXA-8200 (JEOL Ltd, Япония). Образцы для исследования наносили на латунную подложку с помощью двустороннего углеродного скотча и проводили изучение в режиме растрового сканирующего электронного микроскопа во вторичных и в обратно рассеянных электронах. Элементный состав частиц определяли с помощью энергодисперсионного спектрометра (ЭДС) EX-84055 MU при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 5 нА, диаметре зонда 1 мкм, времени

набора спектров 60 с. Спектры обработаны по программе полуколичественного анализа Programme of Semiquantitative Analysis ПО ЭДС микроанализатора Superprobe JXA-8200. Расчет содержаний выполнен в элементной и оксидной формах в ручном режиме.

### Полученные результаты и их обсуждение

С апреля по июнь 2018 г. в пробах планктона, отобранного сетью Джели в заливе Лиственничный южной котловины оз. Байкал с глубин от 1,5 до 25,0 м в различной удаленности от берега (25–4 000 м), нами были обнаружены твердые частицы синего цвета неизвестной природы размером до 1 000 мкм (1 мм). Наиболее крупные из них были видны невооруженным глазом как яркие синие вкрапления на фоне бурой массы фитопланктона, представленного преимущественно диатомовыми водорослями *Synedra asus* subsp. *Radians*, собранного на фильтрах. Более мелкие синие частицы наблюдали при девятикратном увеличении. В табл. 1 в качестве примера приведено количество синих частиц в байкальских пробах, отобранных 14 мая 2018 г. Наибольшее количество частиц отмечено в прибрежной зоне напротив пос. Листвянка, что может говорить о техногенной природе данных частиц.

Было сделано предположение о неорганической природе обнаруженных в Байкале синих частиц, которые не растворялись в органических растворителях. При прокаливании синих частиц в пламени спиртовой горелки (~ 900 °С) на кончике стальной иглы образец, так же как и сама игла, приобретал цвет красного каления. Известно, что цвет свечения металла, разогретого до определенной температуры, характеризуется конкретным спектром теплового излучения. Белый цвет соответствует максимальной температуре ~ 1 300 °С, откуда и пошло устойчивое сочетание «довести до белого каления». Оттенок красного для исследуемых синих частиц, помещенных в пламя, был по сравнению с цветом иглы более светлым и ярким, близким к оранжевому,

Таблица 1

### Биомасса проб байкальского планктона, отобранного в заливе Лиственничный (Южный Байкал) 14 мая 2018 г., и масса содержащихся в нем синих частиц

Номер пробы	Расстояние от берега, м	Глубина отбора, м	Число синих частиц, шт.	Масса частиц, мг	Биомасса планктона, г
1	25	1,6	60	0,10	0,47
2	2 000	5,0	14	0,04	0,92
3	2 000	20,0	10	0,02	0,99
4	4 000	5,0	23	0,02	0,62
5	4 000	20,0	1	–	1,64

что соответствует для металлов температурам  $\sim 900\text{--}1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ , в то время как игла не нагревалась более  $850\text{ }^\circ\text{C}$ , о чем свидетельствовал более темный красный оттенок. При выдерживании в пламени ( $\sim 5$  мин) частица не сгорала, но сразу после прокаливания цвет частицы приобретал светлый оттенок, сходный с минеральным пигментом «глауконит жженный». Таким образом, мы предположили наличие металлов в составе отобранных нами синих частиц.

С целью дальнейшего установления природы и химического состава синих частиц, а также выбора способа их качественного и количественного анализа предварительно была предпринята попытка разложения образцов синих частиц стандартными «мокрыми» методами с использованием минеральных кислот. Было обнаружено, что при помещении частиц в кислоты, не обладающие окислительными свойствами по отношению к металлическим рудам и минералам, а именно в разбавленную серную кислоту  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и концентрированную соляную кислоту  $\text{HCl}$ , которая является отличным растворителем для оксидов многих металлов [7], не наблюдалось видимых при десятикратном увеличении изменений как структуры, так и цвета частиц. При помещении частиц в концентрированную  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , обладающую сильными окислительными свойствами, также не наблюдалось видимого глазом изменения их структуры и цвета. При помещении частиц в концентрированную азотную кислоту  $\text{HNO}_3$ , способную окислять минералы группы сульфидов, арсенидов, фосфатов, а также  $\text{Ag}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Bi}$ ,  $\text{B}$ ,  $\text{Cd}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Ga}$ ,  $\text{In}$ ,  $\text{Ge}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{Hg}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Se}$ ,  $\text{Te}$ ,  $\text{Tl}$ ,  $\text{V}$ , было отмечено выделение пузырьков желто-зеленого цвета [8]. Когда процесс образования пузырьков, вызванный растворением примесей, заканчивался, оказывалась очевидной визуальная неизменность структуры и цвета исследуемых нами частиц. Оттенки синего для отдельных частиц изменялись от светло-голубого до темно-синего (цвета берлинской лазури). Структура одних частиц была визуалью округлая, других — слоистая, либо продолговатая бороздчатая, либо с изломами.

Известно, что в природе большинство металлов не находится в чистом виде, а входит в состав руд в форме тех или иных минералов — оксидов, гидроксидов, солей и комплексов. Для донных осадков Байкала характерно наличие конкреций вивианита — минерала класса фосфатов  $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \times 8\text{H}_2\text{O}$ , как шарообразных, так и слоистых [8; 9]. Цвет вивианита меняется от серого

или индигово-синего, почти черного, до небесно-голубого. Голубой цвет вивианита при поднятии его со дна на поверхность тускнеет и темнеет под воздействием кислорода [10]. Массовые скопления вивианита в южной котловине оз. Байкал в районе пос. Бугульдейка разрабатывались еще в XVIII–XIX вв. и использовались в качестве синей краски в станковой живописи [11; 12]. Его наличие отмечено в красочных слоях русских икон разного времени и разных школ. Но состав найденных нами частиц не может принадлежать вивианиту по той причине, что не подлжит кислотному разложению. Небесно-голубой азурит  $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$  и синий лазурит  $\text{Na}_6\text{Ca}_2(\text{AlSiO}_4)_6(\text{SO}_4, \text{S}, \text{Cl})_2$  (он же ультрамарин) также не подходят, несмотря на значительную до недавнего времени добычу байкальского лазурита на южном побережье Байкала. (Байкальский лазурит даже использовали для облицовки стен знаменитого Исаакиевского собора в Санкт-Петербурге.) Хотя лазурит имеет весьма высокую твердость — 5,5 по десятибалльной шкале Мооса, он быстро растворяется в соляной кислоте с бурным выделением паров сероводорода  $\text{H}_2\text{S}$ .

Другой вариант синего минерала — соединения титана, который входит в IV группу элементов периодической системы [13] и имеет наиболее характерные степени окисления  $+4$  и  $+3$ . Так, смешанный оксид титана  $\text{TiO}_2 \cdot \text{Ti}_2\text{O}_3$  (или  $\text{Ti}_3\text{O}_5$ ) имеет синий цвет, оксид титана III ( $\text{Ti}_2\text{O}_3$ ) — фиолетовый, а диоксид титана  $\text{TiO}_2$ , известный как минеральный пигмент «титановые белила», — чистый белый. Союз титана с кислородом (именно в виде такого соединения этот элемент встречается в природе) является одним из самых прочных среди всех открытых учеными химических соединений: «Ни электрический ток, ни высокие температуры, ни агрессивные кислоты не в силах вырвать титан из объятий кислорода» [14]. Известно, что при нагревании кислородные соединения титана восстанавливаются углеродом и активными металлами ( $\text{Mg}$ ,  $\text{Ca}$ ,  $\text{Na}$ ) до низших оксидов. Таким образом, можно предположить, что при прокаливании в пламени спиртовки синей частицы, которая может являться оксидом  $\text{Ti}_3\text{O}_5$ , возможно его восстановление до монооксида  $\text{TiO}$ , имеющего цвет от золотисто-желтого до коричнево-фиолетового, что и наблюдалось нами в описанном эксперименте.

На рис. 1 представлен снимок синей частицы (1) размером  $\sim 120 \times 300$  мкм (масштаб приведен в правом нижнем углу), найденной в биомассе планктона. На фоне

синей частицы видны игольчатые клетки диатомовых водорослей *Synedra acus* (2) и две округлые клетки (3), вероятно бактериальной природы, находящиеся на поверхности ближе к центру.

С помощью энергодисперсионной приставки рентгеновского микроанализа EDAX на микроскопе Quanta 200 3D был оценен качественный состав поверхности образца в различных точках (рис. 2). Пики алюминия (Al) на

спектрах обусловлены алюминиевой поверхностью столика, на котором располагалась проба, а пики золота (Au) — напылением поверхности образцов золотом при подготовке к анализу. Видно, что спектр, полученный с поверхности клетки водорослей *Synedra acus* (см. рис. 2, нижний спектр, и рис. 1, точка 4), характеризуется наличием пиков кремния (Si), магния (Mg) и кислорода (O), что очевидно, так как створки диатомовых водорослей

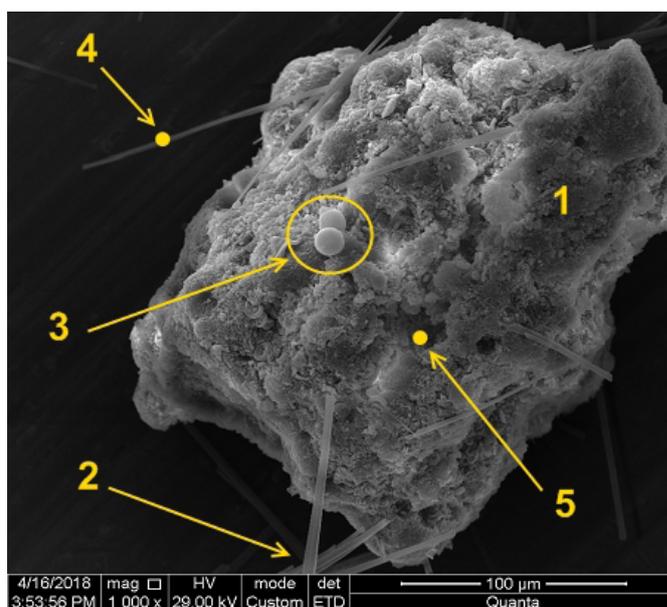


Рис. 1. Растровое изображение синей частицы, полученное методом электронной микроскопии на микроскопе Quanta 200 3D

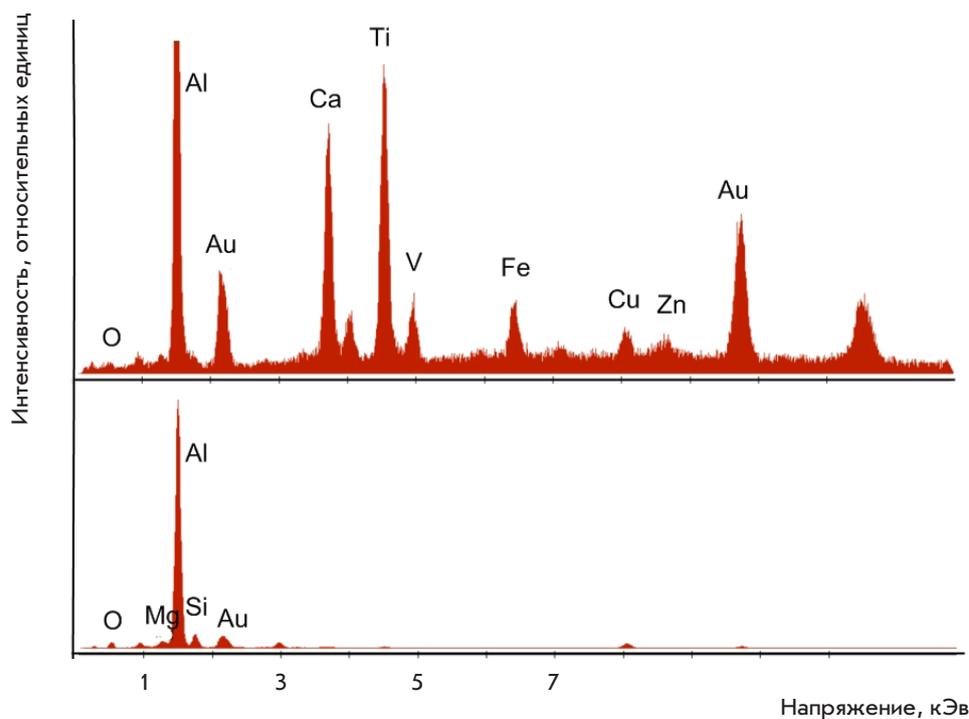


Рис. 2. Рентгеновский спектр поверхности одной из найденных синих частиц (см. рис. 1, точка 5), полученный с помощью энергодисперсионной приставки EDAX

представлены главным образом диоксидом кремния  $\text{SiO}_2$  (кремнеземом) [2; 15]. Спектр, полученный с поверхности (см. рис. 1, точка 5) исследуемой синей частицы, характеризуется максимальным содержанием элементов кальция (Ca), титана (Ti) и металлов Fe, V, Cu и Zn (см. рис. 2, верхний спектр).

Для детального изучения и определения элементного состава синих частиц использовали локальные методы исследования МС-ИСП и рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа. Эти методы отличаются высокой чувствительностью, экспрессностью, информативностью и надежностью. Например, для получения достоверного масс-спектра вещества на рутинном масс-спектрометре достаточно всего  $10^{-9}$ – $10^{-10}$  г вещества. Масс-спектрометрист А.Т. Лебедев говорит, что масс-спектрометрический эксперимент сравним с русской задачей поиска иголки в стоге сена, но, если быть точнее, анализ молекулы методом масс-спектрометрии сравним с поиском иголки в нескольких миллионах стогах сена [16]. При этом уникальность масс-спектров конкретного вещества в своем роде можно сравнить с отпечатками пальцев конкретного человека, что позволяет надеж-

но идентифицировать те или иные химические соединения. Полевая десорбция (лазерная абляция), или, проще говоря, выбивание молекул и атомов вещества с поверхности образца лазерным импульсом, создаваемым эмиттером с высоким напряжением (~ 8–10 кВ), позволяет переводить молекулы и атомы образца в состояние плазмы, т.е. ионизованного газа, делая их доступными для анализа методом МС-ИСП.

Методами полевой десорбции и МС-ИСП был установлен примерный набор элементов, входящих в состав исследованных синих частиц (табл. 2). Наибольшее содержание (масс. %) отмечено для титана, кальция и кремния, сравнительно высокое содержание — для токсичных тяжелых металлов, таких как цинк (Zn), свинец (Pb), сурьма (Sb), ниобий (Nb), медь (Cu), мышьяк (As). Установлено наличие в пробах и ртути (Hg). Высокое содержание кремния может быть обусловлено налетом кремнезема и клеток диатомовых водорослей на поверхности образца, к тому же этот элемент встречался не во всех проанализированных нами пробах (см. рис. 1).

Также на микроанализаторе Superprobe JXA-8200 дополнительно проведено иссле-

Таблица 2

**Среднее содержание химических элементов, входящих в состав синих частиц ( $n = 5$ ) (полуколичественный анализ методом МС-ИСП)**

Элемент	Масс. %, от $3,8 \cdot 10^{-8}$ до $6,1 \cdot 10^{-4}$	Элемент/масса его изотопа	Масс. %, от $6,7 \cdot 10^{-4}$ до $2,2 \cdot 10^{-2}$	Элемент/масса его изотопа	Масс. %, от $2,7 \cdot 10^{-2}$ до $61,0 \cdot 10^{-4}$
Ir	0,000 000 038	Se	0,000 67	Cu	0,027
Re	0,000 002 9	Gd	0,000 88	Ni	0,030
Rh	0,000 014	Sc	0,001 00	Zr	0,030
Pt	0,000 014	Sm	0,001 01	Cd	0,053
Lu	0,000 031	Ga	0,001 2	Ba	0,054
Tm	0,000 045	Li	0,001 3	P	0,073
In	0,000 048	Pr	0,001 3	S	0,085
Pd	0,000 052	Hf	0,001 5	Nb	0,096
Be	0,000 055	As	0,002 9	Sr	0,10
Tl	0,000 087	W	0,003 2	K	0,12
Au	0,000 089	Y	0,003 5	Mg	0,33
Bi	0,000 10	Ta	0,003 9	Mn	0,40
Tb	0,000 12	Nd	0,004 6	Fe	0,45
Ho	0,000 13	Co	0,004 9	Sb	0,61
Th	0,000 18	La	0,006 4	Na	0,82
Yb	0,000 29	Sn	0,007 2	Pb	0,94
Er	0,000 29	V	0,008 9	Zn	1,7
Cs	0,000 30	Ce	0,009 1	Al	3,1
Ag	0,000 36	Mo	0,009 8	Si	14,9
Eu	0,000 43	Cl	0,018	Ca	52,4
Ge	0,000 43	B	0,019	Ti	60,7
U	0,000 58	Rb	0,020		
Dy	0,000 61	Cr	0,022		

дование синих частиц взвешенного вещества байкальской воды методом РСМА, основанного на взаимодействии тонкого пучка электронов с анализируемым веществом, в результате которого возникает характеристическое рентгеновское излучение элементов, присутствующих в данном образце. Атом любого химического элемента имеет ядро, окруженное оболочками, подобными орбитам вокруг Солнца, по которым движутся электроны. Направленный пучок быстролетящих электронов (электронная пушка) способен выбивать электроны с орбит атомов, максимально удаленных от ядра. На место выбитых электронов переходят электроны с нижних, более близких к ядру орбит, что сопровождается характерным для каждого вида атомов рентгеновским излучением [17]. Выбитые электроны поступают на счетчик Гейгера — Мюллера, представляющий собой устройство из двух электродов в камере, заполненной инертным газом аргоном. Возникающее рентгеновское излучение ионизирует аргон в камере, и цепь замыкается, давая отклик с интенсивностью, зависящей от мощности излучения, которая, в свою очередь, прямо зависит от концентрации элемента в образце. Чем больше концентрация элемента, тем больше электронов данного типа атомов выбивается с поверхности и тем интенсивнее мы получаем сигнал.

Основная цель исследования методом РСМА найденных в Байкале синих частиц заключалась в изучении элементного состава, фазового распределения материала по поверхности частиц и оценки возможного техногенного загрязнения воды озера. Предварительно все образцы синих частиц были изучены в режиме растрового сканирующего электронного микроскопа во вторичных (для детального изучения поверхности) и в обратно рассеянных (для оценки однородности распределения основных компонентов по матрице анализируемого образца) электронах (рис. 3, режимы А и Б). Это позволило оценить размеры и форму частиц, изучить их поверхность, а также проанализировать распределение определяемых элементов по матрице образцов. Показано, что частицы представляют собой конгломераты различной формы: ограненной, полуограненной, неправильной, вытянутой, овальной и округлой (см. рис. 3). Размер частиц изменяется в диапазоне от 120 до 900 мкм. В целом матрица всех исследуемых частиц по образцам неоднородна по составу, чему соответствуют светлые, светло-серые и темно-серые области, а также светлые яркие области. Некоторые из синих частиц облепле-

ны более мелкими частицами взвешенного в воде вещества, клетками бактерий, фитопланктона, кремниевыми створками отмерших диатомовых (см. рис. 3, частица 2, Б).

Элементный состав синих частиц представлен в основном металлами (Ti, Ca, Fe, Al, Na, K) и неметаллом кремнием (Si). Наряду с этими элементами в единичных точечных измерениях определено значимое содержание Cu, Zn, Mg, S, Cl, Ba и Pb. Кроме того, на спектрах синих частиц присутствовали пики кислорода (O), содержание которого варьировалось в диапазоне от 30 до 50 %, и углерода (C) с содержанием от 10 до 60 %, зачастую более интенсивные, чем пики прочих элементов.

Содержание кислорода в составе частиц может быть объяснено как наличием воды, поскольку образцы перед анализом не высушивали, так и входящими в состав окислов или солей кислородсодержащих кислот. Высокое содержание углерода в составе частиц в качестве сажистой фазы представляется маловероятным, так как известно, что состав наиболее распространенных типов сажа представлен главным образом углеродом (99,5 до 95,0 % по массе), а доля кислорода не превышает 5 масс. % [18].

В табл. 3 приведен состав элементов, полученный нами для порошка состава «минерал вивианит»  $Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$ , где преобладают Fe и P ( $m = 2$ ), а также отмечено высокое содержание Si, Na, Al, представляющих наиболее распространенные в природе минералы — алюмосиликаты. Спектры, полученные для вивианита, отличаются относительно высоким содержанием кислорода, доля углерода не превышает 4 %, что делает маловероятным появление углеродного пика на спектрах синих частиц за счет материала углеродной подложки. Можно предположить природу частиц как неких продуктов спекания сажа с солями или окислами металлов.

Другое предположение о природе найденных нами синих частиц заключается в том, что это могут быть сорбенты на основе титана, например гидроксид титана (IV), фосфаты и силикаты титана [19]. Такие сорбенты используют предприятия горнодобывающей и химической промышленности. Так, гидроксид титана, обладающий ионообменными свойствами, хорошо извлекает из воды ионы цветных (Cu, Al, Zn, Sn, Pb, Ni, Cr, Ag, Au и пр.) и тяжелых металлов и может использоваться как для сорбции отходов, в том числе радиоактивных элементов, так и для извлечения остаточных количеств золота, никеля и меди в цветной металлургии.

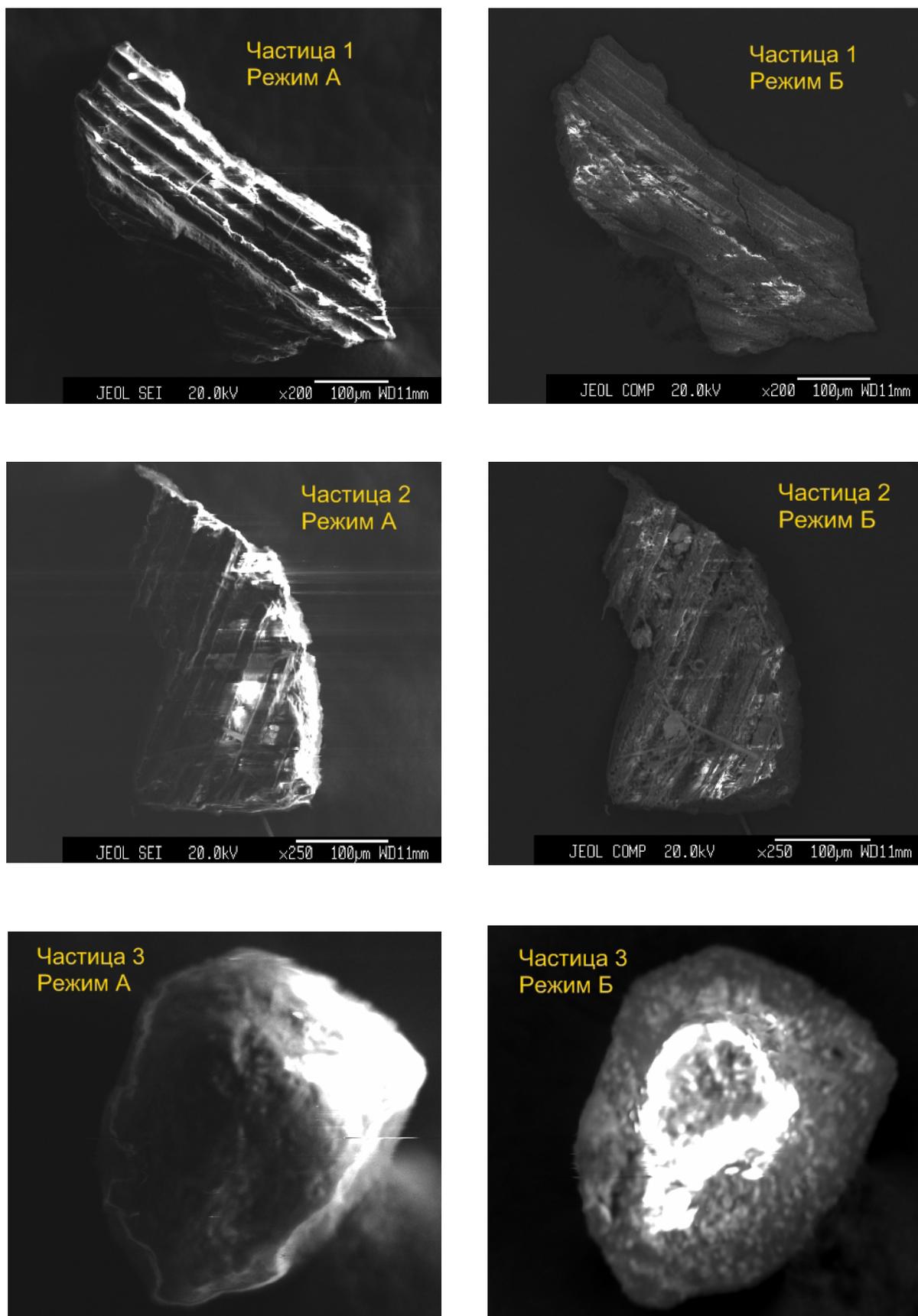


Рис. 3. Снимки частиц различной формы и интенсивности синего цвета, найденных во взвешенном веществе оз. Байкал, в двух режимах: А — во вторичных электронах; Б — в обратно рассеянных электронах

Таблица 3

**Элементный состав синих частиц, определенный методом РСМА  
(без учета С и О), масс. %**

Элемент	Минерал вивианит	Точечные анализы ( $m = 9$ ) исследуемых образцов синих частиц байкальской взвеси ( $n = 5$ )								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ti		56,0	51,00	59,0	59	16,0	43,00	71,0	5,7	64,00
Ca		17,0	28,00	20,5	41	8,0	12,00	3,1	8,6	19,00
Si	7,5	6,0	11,00			56,0	23,00		0,8	3,00
Fe	50,0	15,0	7,62	20,2		5,4	6,80			9,20
Al	4,5					4,1	4,40	1,6		0,17
Na	9,0					2,9	4,00			
S	3,5					3,8	2,20	14,0		
K		3,3	1,90			1,8	3,00			1,70
Cu										2,70
Mg	1,6					1,7	0,81			
Zn								11,0	63,0	
P	24,0	2,7								

Гидроксид титана, модифицированный группами  $\text{HCO}_3^-$ , сорбирует и редкоземельные элементы. В случае найденных нами синих частиц (см. табл. 2) максимальное содержание редкоземельных элементов ( $\sim 10^{-3}$ ) характерно для празеодима (Pr), иттрия (Y), неодима (Nd) и лантана (La). Катионы Na, Al и Si практически не сорбируются модифицированным сорбентом. В Забайкалье известны рудники золотодобычи, большинство из которых в настоящее время не активно, месторождения полиметаллических руд (Cu, Ni, Zn, Pb, Ag, Be, U, Mo, W и др.), в частности на территории водосборного бассейна Селенги, вносящей до 50 % ежегодного водного притока воды в озеро<sup>3</sup>. До недавнего времени на Северном Байкале действовало Холоднинское месторождение полиметаллических руд (Zn, Pb, другие металлы, пирит ( $\text{FeS}_2$ )), но в связи с возникшей неблагоприятной экологической ситуацией его разработка остановлена. Известны рудники кварцитовых песчаников, основными примесями которых являются оксиды титана и железа. По данным комплексных эколого-геохимических и гидрологических исследований, проводившихся в 2008–2017 гг. на территории Монголии и Республики Бурятия, детально проанализирован перенос загрязняющих веществ, тяжелых металлов и металлоидов в Селенгу по притокам, последующая их аккумуляция в дельте Селенги и дальнейшее поступление указанных чужеродных веществ в Байкал с четким шлейфом мутности [20]. Также значительное техногенное воздействие на речные воды оказывает Улан-Батор, гор-

но-обоганительный комбинат «Эрдэнэт» — одно из крупнейших в Азии предприятий по добыче и обогащению меди и молибдена (переработка 26 млн т руды в год), золотые прииски на Тууле и Харе. На территории России в Восточно-Сибирском регионе выделяется Улан-Удэ с развитой промышленностью и Закаменск, где особую экологическую опасность представляют хвостохранилища (комплекс специальных сооружений и оборудования, предназначенный для хранения или захоронения радиоактивных, токсичных и других отвальных отходов (так называемых хвостов) обогащения полезных ископаемых) бывшего Джидинского вольфрамо-молибденового комбината. В ходе исследования миграции потоков взвешенного вещества в системе р. Селенга — оз. Байкал Н.С. Касимовым с коллегами [21] методами масс-спектрометрии и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой было проанализировано более 400 проб воды и взвешенных наносов. Показано, что реки бассейна Селенги обогащены (относительно среднего содержания в реках мира) растворенными элементами (Sr, Li, U, Br, V, Mo, As), для которых преобладающей формой миграции является ионная, а также Fe, Al, Zn и Pb, мигрирующими в форме комплексных соединений с органическим веществом. Во взвешенных наносах Селенги и ее притоков повышено содержание As, Cd, Mo, Pb, Zn, Mn, Co, что обусловлено как геохимической специализацией региона (As), так и техногенным воздействием (Cd, Mo, Pb). Доля взвешенных форм миграции резко возрастает при прохождении паводков, особенно в верховьях рек; в нижней части

<sup>3</sup> Горнодобывающая промышленность Бурятии. URL: <https://www.wikiwand.com/ru>.

бассейна влияние паводков на соотношение форм уменьшается, что особенно заметно в дельте Селенги. Кроме того, перенос взвешенного вещества в озере осуществляется за счет его внутренних течений [22]. Геохимические потоки растворенных форм тяжелых металлов в паводок увеличивались по направлению к дельте Селенги по мере возрастания водности реки. Стоит напомнить, что время наблюдения нами синих частиц во взвешенном веществе байкальской воды в заливе Лиственничный приходилось именно на время весенних паводков. В 2019 г. пробы взвешенного вещества байкальской воды были собраны нами в более поздний период (28 мая — 6 июня). В пробах, отобранных в южной котловине (N 51°50'822", E 104°50'600" — район пос. Листвянка напротив устья р. Сенной, N 51°50'657", E 104°52'473" — напротив нерпинария, N 51°47'828", E 104°21'148" — мыс Половинный, N 51°43'147", E 103°42'964" — район пос. Култук), были обнаружены единичные вкрапления синих частиц. При отборе проб в осенний период (13–28 сентября 2019 г.) синих частиц обнаружено не было. В районе дельты Селенги в указанные весенне-летний и осенний периоды 2019 г. было взято четыре пробы в двух точках (N 52°19'853", E 106°14'575" и N 52°23'910", E 106°32'146"). Синих частиц в них не было обнаружено.

Еще одно предположение о природе найденных в байкальской взвеси синих частиц — различные краски (например, корабельные) на основе диоксида титана (титановых белил), цветность которых обусловлена наличием примесей других элементов, так называемых хромофоров, которыми чаще всего являются ионы Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Cr, Co, и некоторых других. Так, ионы Fe<sup>2+</sup> и Cu<sup>2+</sup>, поглощающие красный свет, как правило, придают минералам зеленый, а иногда и синий, вплоть до черного, цвет. Как видно из табл. 3, железо содержалось в ряде исследованных нами

частиц, но частицы, в которых содержание железа было ниже пределов обнаружения, также имели синий цвет. Стоит отметить, что во взвешенном веществе оз. Байкал (южная котловина) в значительном количестве обнаружены также оранжево-красные вкрапления размером до 1 мм судовой краски на основе свинцового сурика (ортоплюмбат свинца Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), которой кроют днища судов и кораблей для предотвращения процессов коррозии и обрастания. Вопрос об окончательной природе синих частиц остался открытым, хотя последний вариант представляется более вероятным.

### Выводы

С помощью методов электронной микроскопии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа проведены исследования синих микрочастиц неизвестной природы, обнаруженных во взвешенном веществе байкальской воды, в форме ярких вкраплений на фоне бурой биомассы байкальского фитопланктона. Изучена их структура и состав. Среди 68 элементов, входящих в состав частиц, наибольшее содержание отмечено для Ti (до 60 %) и Ca (до 30 %), которые содержались во всех пробах. Наряду с этими элементами в единичных точечных измерениях определено значимое содержание металлов Al, Zn, Pb, Fe, Na, K, Cu, Mg, Mn, Mo, Nb, Ba, микропримеси Cd, Ag, Sb, As, а также Si и S, многие из которых являются редкими для Байкала элементами, особенно цветные и тяжелые металлы Zn, Pb, Sb, Nb, Cu, As. Имеют место четыре версии о природе синих частиц:

- оксид титана TiO<sub>2</sub> · Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (или Ti<sub>3</sub>O<sub>5</sub>);
- в форме продуктов спекания титана с сажистой фазой;
- в составе сорбентов на основе соединений титана;
- в составе титановых красок.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галазий Г.И. Атлас Байкала / Г.И. Галазий. — Москва : Роскартография, 1993. — 160 с.
2. Грачев М.А. О современном состоянии экологической системы озера Байкал / М.А. Грачев. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2002. — 156 с.
3. Дроздов В.В. Общая экология / В.В. Дроздов. — Санкт-Петербург : Изд-во Рос. гос. гидрометеоролог. ун-та, 2011. — 412 с.
4. Семерной В.П. Олигохеты озера Байкал / В.П. Семерной. — Новосибирск : Наука, 2004. — 528 с.
5. Микробное сообщество пресноводных губок озера Байкал / В.В. Парфенова, И.А. Теркина, Т.Я. Косторова [и др.] // Известия Российской академии наук. Сер. биологическая. — 2008. — № 4. — С. 435–441.
6. Путь познания Байкала / Э.Л. Афанасьева, М.Ю. Бекман, Е.В. Безрукова [и др.]. — Новосибирск : Наука, 1987. — 304 с.
7. Карпов Ю.А. Методы пробоотбора и пробоподготовки / Ю.А. Карпов, А.П. Савостин. — Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. — 243 с.
8. Выхристюк Л.А. Органическое вещество донных осадков Байкала / Л.А. Выхристюк ; под ред. К.К. Воинцева. — Новосибирск : Наука, 1980. — 80 с.

9. Гранина Л.З. Железомарганцевые образования в районе озера Байкал / Л.З. Гранина, В.Д. Мац, М.А. Федорин // Геология и геофизика. — 2010. — Т. 51, № 6. — С. 835–848.
10. Мизандронцев И.Б. Химические процессы в донных отложениях водоемов / И.Б. Мизандронцев; под ред. Л.М. Галкина. — Новосибирск : Наука, 1990. — 172 с.
11. Слётов В.А. Минеральные пигменты в иконописной традиции / В.А. Слётов // Рисуя минералы. — 1997. — URL: <http://mindraw.web.ru/bibl15.htm>.
12. Монахиня Иулиания (Соколова М.Н.). Труд иконописца / Монахиня Иулиания (М.Н. Соколова). — Сергиев Посад : Свято-Троиц. Сергиева Лавра, 1998. — 225 с.
13. Практическое пособие по общей и неорганической химии для студентов нехимических специальностей : учеб. пособие / Н.Л. Абрамычева, О.В. Архангельская, В.Б. Бернад [и др.]; под ред. С.Ф. Дунаева. — Москва : Изд-во МГУ, 2003. — Ч. 2. — URL: <http://www.chem.msu.ru/rus/teaching/dunaev>.
14. Венецкий С.И. Рассказы о металлах / С.И. Венецкий. — Москва : Metallurgia, 1979. — 240 с.
15. Леонова В.А. Геохимическая роль планктона континентальных водоемов Сибири в концентрировании и биоседиментации микроэлементов / В.А. Леонова, Г.А. Бобров. — Новосибирск : Гео, 2012. — 314 с.
16. Лебедев А.Т. Масс-спектрометрия в органической химии / А.Т. Лебедев. — Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. — 493 с.
17. Васильев В.П. Аналитическая химия : учебник. В 2 кн. Кн. 2 : Физико-химические методы анализа / В.П. Васильев. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Дрофа, 2002. — 384 с.
18. Энциклопедия полимеров / под ред. В.А. Каргина. — Москва : Сов. энцикл., 1974. — Т. 2. — 1032 с.
19. Николаев А.И. Новые сорбенты на основе техногенных продуктов ОАО «АПТИТ» для обезвреживания радиоактивных и токсичных отходов / А.И. Николаев, Л.Г. Герасимова, М.В. Маслова // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2014. — Т. 2, № 17. — С. 91–100.
20. Эколого-географический атлас-монография «Селенга-Байкал» / под ред. Н.С. Касимова. — Москва : Геогр. фак. МГУ, 2019. — 288 с.
21. Бассейновый анализ потоков веществ в системе Селенга — Байкал / Н.С. Касимов, М.Ю. Лычагин, С.Р. Чалов [и др.] // Вестник Московского университета. Сер. 5, География. — 2016. — № 3. — С. 67–81.
22. Шимараев М.Н. Течения и водообмен / М.Н. Шимараев // Байкал: природа и люди : энцикл. справ. / под ред. А.К. Тулохонова. — Улан-Удэ : ЭКОС, 2009. — URL: [http://www.baikalfund.ru/baikal/geography/nature/index.wbp?doc\\_id=7d6a16ec-ede1-470a-b7f6-634a298791b6](http://www.baikalfund.ru/baikal/geography/nature/index.wbp?doc_id=7d6a16ec-ede1-470a-b7f6-634a298791b6).

#### REFERENCES

1. Galazy G.I. *Atlas Baikala* [Atlas of Lake Baikal]. Moscow, Roskartografiya Publ., 160 p.
2. Grachev M.A. *O sovremennom sostoyanii ekologicheskoi sistemy ozera Baikal* [On the Current State of the Ecological System of Lake Baikal]. Novosibirsk, Publishing House of Siberian Publ., 2002. 156 p.
3. Drozdov V.V. *Obshchaya ekologiya* [General Ecology]. Saint Petersburg, Russian State Hydrometeorological University Publ., 2011. 412 p.
4. Semernoi V.P. *Oligokhety ozera Baikal* [Oligochaeta of Lake Baikal]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2004. 528 p.
5. Parfenova V.V., Terkina I.A., Kostornova T.Ya., Nikulina I.G., Chernykh V.I., Maksimova E.A. Microbial Community of Freshwater Sponges in Lake Baikal. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya Biologicheskaya = Izvestiya of RAS: Biological Series*, 2008, no. 4, pp. 435–441. (In Russian).
6. Afanasieva E.L., Bekman M.Yu., Bezrukova E.V. [et al.]. *Put' poznaniya Baikala* [The Path of Knowledge of Lake Baikal]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1987. 304 p.
7. Karpov Yu.A., Savostin A.P. *Metody probootbora i probopodgotovki* [Methods of probe selection and probe preparation]. Moscow, BINOM. Laboratoriya Znaniy Publ., 2003. 243 p.
8. Vykhristyuk L.A.; Votintsev K.K. (ed.). *Organicheskoe veshchestvo donnykh osadkov Baikala* [Organic Matter of Bottom Sediments of Baikal]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980. 80 p.
9. Granina L.Z., Mats V.D., Phedorin M.A. Iron-manganese Formations in the of Lake Baikal Region. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, no. 6, pp. 835–848. (In Russian).
10. Mizandrntsev I.B.; Galkin L.M. (ed.). *Khimicheskie protsessy v donnykh otlozheniyakh vodoemov* [Chemical processes in benthal deposits of water reservoirs]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990. 172 p.
11. Sletov V.A. Mineral pigments in the icon painting tradition. *Risuya mineraly = Mineral Drawings*, 1997. Available at: <http://mindraw.web.ru/bibl15.htm>. (In Russian).
12. Sokolova M.N. *Trud ikonopitsa* [Work of the icon painter]. Sergiev Posad, The Holy Trinity— St. Sergius Lavolta Publ., 1998. 225 p.
13. Abramycheva N.L., Arkhangel'skaya O.V., Bernard V.B., Bukhanko N.G., Zhmurko G.P.; Dunaev S.F. (ed.). *Prakticheskoe posobie po obshchei i neorganicheskoi khimii dlya studentov nekhimicheskikh spetsial'nostei* [Practical Manual on General and Inorganic Chemistry for Students of Non-chemical Specialties]. Moscow, Lomonosov State University Publ., 2003. Pt. 2. Available at: <http://www.chem.msu.ru/rus/teaching/dunaev>.
14. Venetsky S.I. *Rasskazy o metallakh* [Stories about metals]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 240 p.
15. Leonova V.A., Bobrov G.A. *Geokhimicheskaya rol' planktona kontinental'nykh vodoemov Sibiri v kontsentririrovani i biosedimentatsii mikroelementov* [Geochemical Role of Plankton of Continental Water Bodies in Siberian in Concentration]. Novosibirsk, Geo Publ., 2012. 314 p.
16. Lebedev A.T. *Mass-spektrometriya v organicheskoi khimii* [Mass Spectrometry in Organic Chemistry]. Moscow, BINOM. Laboratoriya Znaniy Publ., 2003. 493 p.
17. Vasiliev V.P. *Analiticheskaya khimiya* [Analytical Chemistry]. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Drofa Publ., 2002. B. 2. 384 p.

18. Kargin V.A. (ed.). *Entsiklopediya polimerov* [Encyclopedia of Polymers]. Moscow, Sovetskaya Entsiklopediya Publ., 1974. Vol. 2. 1032 p.

19. Nikolaev A.I., Gerasimova L.G., Maslova M.V. New Sorbents from the Waste of JSC «APATIT» for Radionuclides and Toxicants Decontamination. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN = Herald of the Kola Science Centre of RAS*, 2014, vol. 2, no. 17, pp. 91–100. (In Russian).

20. Kasimov N.S. (ed.). *Ekologo-geograficheskii atlas-monografiya «Selenga — Baikal»* [Ecological and Geographical Atlas-monograph «Selenga — Baikal»]. Lomonosov Moscow State University Publ., 2019. 288 p.

21. Kasimov N.S., Lychagin M.Yu., Chalov S.R., Shinkareva G.L., Pashkina M.P. Catchment Based Analysis of Matter Flows in the Selenga-Baikal System. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya = Moscow University Bulletin. Series 5, Geography*, 2016, no. 3, pp. 67–81. (In Russian).

22. Shimaraev M.N. Currents and Water Exchange. In Tulokhonov A.K. (ed.). *Baikal: priroda i lyudi* [Baikal: Nature and People]. Ulan-Ude, EKOS Publ., 2009. Available at: [http://www.baikalfund.ru/baikal/geography/nature/index.wbp?doc\\_id=7d6a16ec-ede1-470a-b7f6-634a298791b6](http://www.baikalfund.ru/baikal/geography/nature/index.wbp?doc_id=7d6a16ec-ede1-470a-b7f6-634a298791b6). (In Russian).

#### Информация об авторах

**Белозерова Ольга Юрьевна** — кандидат химических наук, старший научный сотрудник, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: obel@igc.irk.ru.

**Егоров Виктор Иванович** — главный специалист отдела ультраструктуры клетки, Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: egor@lin.irk.ru.

**Чебыкин Александр Павлович** — главный специалист-технолог лаборатории гидрохимии и химии атмосферы, Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: limno@yandex.ru.

**Мизандронцев Игорь Борисович** — доктор химических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидрохимии и химии атмосферы, Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: mizandr@lin.irk.ru.

**Шишлянникова Татьяна Александровна** — ведущий инженер, Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация.

**Никонова Алена Александровна** — кандидат химических наук, главный специалист лаборатории хроматографии, Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: alenaxis@list.ru.

#### Для цитирования

Применение методов электронной микроскопии, масс-спектрометрии и рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализа в эколого-аналитических исследованиях. Элементный состав синих микрочастиц неизвестной природы, наблюдаемых во взвешенном веществе озера Байкал / О.Ю. Белозерова, В.И. Егоров, А.П. Чебыкин, И.Б. Мизандронцев, Т.А. Шишлянникова, А.А. Никонова. — DOI: 10.17150/2500-2759.2019.29(4).533-544 // Известия Байкальского государственного университета. — 2019. — Т. 29, № 4. — С. 533–544.

#### Authors

**Olga Yu. Belozerova** — Ph.D. in Chemistry, Senior Researcher, A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, the Russian Federation, e-mail: obel@igc.irk.ru.

**Viktor I. Egorov** — Senior Specialist, Department of Cell Ultrastructure, Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, the Russian Federation, e-mail: egor@lin.irk.ru.

**Aleksandr P. Chebikin** — Senior Specialist-Technologist, Laboratory of Hydrochemistry and Chemistry of Atmosphere, Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, the Russian Federation, e-mail: limno@yandex.ru.

**Igor B. Mizandrontsev** — D.Sc. in Chemistry, Senior Researcher, Laboratory of Hydrochemistry and Chemistry of Atmosphere, Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, the Russian Federation, e-mail: mizandr@lin.irk.ru.

**Tatiana A. Shishlyannikova** — Leading Engineer, Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, the Russian Federation.

**Alyona A. Nikonova** — Ph.D. in Chemistry, Chief Specialist of Chromatography Laboratory, Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, the Russian Federation, e-mail: alenaxis@list.ru.

#### For Citation

Belozerova O.Yu., Egorov V.I., Chebikin A.P., Mizandrontsev I.B., Shishlyannikova T.A., Nikonova A.A. Use of Methods of Electronic Microscopy, Mass-Spectrometry and Roentgenospectral Electronic Probe Micro-Analyzer in Ecological and Analytical Studies. Elemental Composition of Blue Micro-Particles of Unknown Nature Observed in Suspended Substance of Lake Baikal. *Izvestiya Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Baikal State University*, 2019, vol. 29, no. 4, pp. 533–544. DOI: 10.17150/2500-2759.2019.29(4).533-544. (In Russian).