

УДК 551.794,551.3.051

## ЭЛЕКТРОННАЯ СКАНИРУЮЩАЯ МИКРОСКОПИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МАГНИТНОЙ ФРАКЦИИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ОЗЕР ЮЖНОГО УРАЛА

© 2019 г. А. Р. Юсупова<sup>1, \*</sup>, Л. Р. Косарева<sup>1</sup>, Д. М. Кузина<sup>1</sup>, В. В. Воробьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
“Казанский (Приволжский) федеральный университет”, Институт геологии и нефтегазовых технологий,  
Казань, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
“Казанский (Приволжский) федеральный университет”, Междисциплинарный центр “Аналитическая микроскопия”,  
Казань, Россия

\*E-mail: yusupovaanast095@gmail.com

Поступила в редакцию 29.04.2019 г.

После доработки 10.06.2019 г.

Принята к публикации 27.07.2019 г.

Рассмотрены особенности осадконакопления озер Южного Урала Большой Кисегач и Тургояк на основе изучения магнитных свойств осадков и магнитной фракции с помощью сканирующей электронной микроскопии. Магнитный материал озерных осадочных образований представлен аутигенными и аллотигенными минералами.

DOI: 10.1134/S0367676519110279

### ВВЕДЕНИЕ

Магнитно-минералогические исследования являются важным направлением в комплексе лабораторных исследований, включающие в себя такие методы как измерение магнитной восприимчивости, естественной остаточной намагниченности, коэрцитивную спектрометрию и термоманитный анализ. Эти анализы являются достаточно простыми, экспрессными, в большинстве случаев не разрушающими образцы. Методы являются косвенными, в связи с чем результаты исследований принято подтверждать прямыми методами наблюдений, к таковым относится электронная микроскопия, которая, кроме изучения элементного состава частиц и выявления минералогии, позволяет также определить генезис на основе формы, размера и текстурных особенностей.

### ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе приведены результаты исследований осадочных отложений озер Южного Урала Большой Кисегач (55°02'20" с.ш.; 60°18'30" в.д.) и Тургояк (55°09'13" с.ш.; 60°06'31" в.д.), расположенные в Чебаркульском районе Челябинской области.

Озеро Большой Кисегач расположено на восточном склоне Ильменского хребта. Кисегач – самое большое озеро в районе: объем воды составляет 268 млн м<sup>3</sup>, максимальная глубина – 31 м, средняя

глубина 15 м, площадь зеркала 14 км<sup>2</sup>. По данным Ильменского заповедника имеются воронки глубиной до 49 м. Площадь водосбора 114 км<sup>2</sup>. Отметка уровня воды 316 м. Возраст озера не менее 13 тысяч лет.

На озере около 20 островов, из них 6 крупных. Это вершины гор, оказавшиеся под водой при образовании озера на месте тектонического разлома. Многие из них имеют обрывистые берега и сложены из гранитных плит.

Питание озера происходит за счет поверхностного и подземного стоков, небольших речек и ручьев, атмосферных осадков. В озеро по протоке с южной стороны течет вода из оз. Теренкуль, а с северной вытекает ручей Исток в озеро М. Кисегач, которое расположено на километр севернее. С западной стороны в озеро впадают речки Шумиха, Каменка и Безымянный, с северо-запада – речка Осиновая. С восточной стороны впадает ручей из озера Торфяное, которое расположено в километре, между озерами Б. Кисегач и Б. Сунукуль. Еще в озеро впадает ручей в районе Сухой курьи. Большинство ручьев в конце лета пересыхают. На западном берегу много так называемых каменных палаток, чертовых стенок, гранитных карнизов. Протяженность береговой линии 26 км, в т. ч. по территории городского округа 2,4 км. Минерализация воды в среднем составляет 250 мг · л<sup>-1</sup>, воды мягкие, гидрокарбонатно-кальциевые [6].

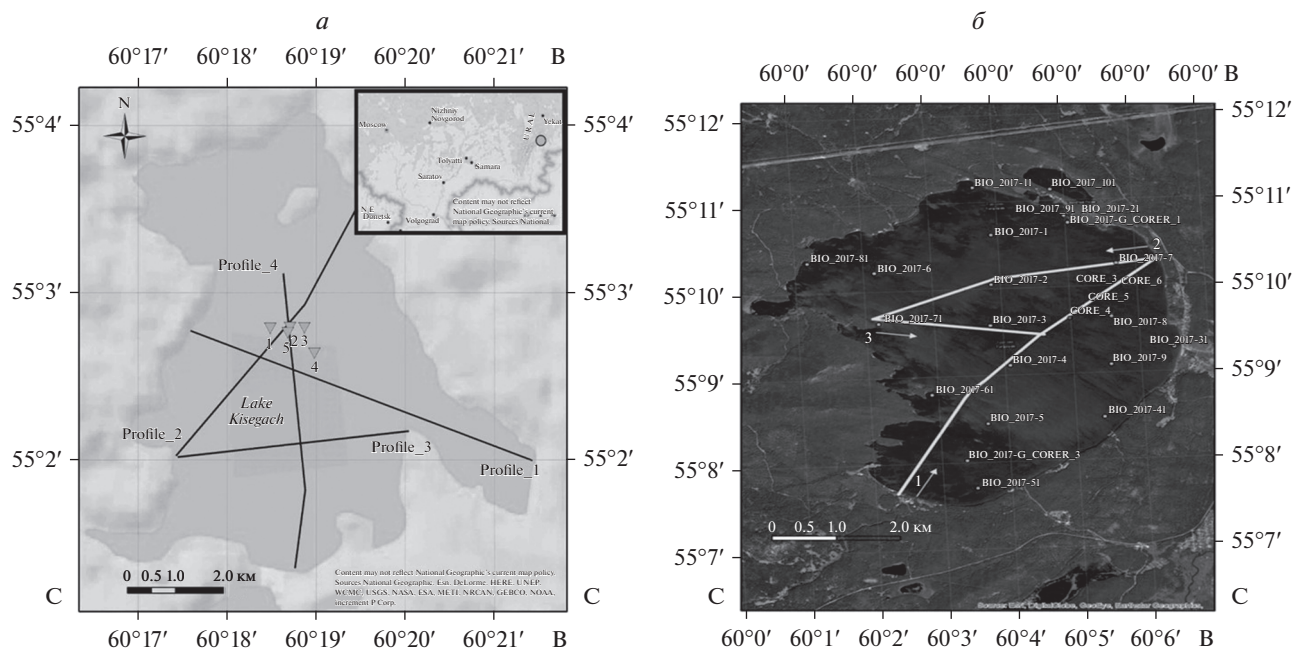


Рис. 1. Расположение сейсмоакустических профилей и точек отбора керна на озерах Большой Кисегач (а) и Тургояк (б).

Тургояк расположен в глубокой межгорной котловине между хребтами Урал-Тау и Ильменским на высоте 320 м над уровнем моря. Это наиболее глубокое озеро на Южном Урале: глубина его достигает 34 м, средняя глубина – 19.2 м. Вода озера имеет высокую прозрачность, которая составляет от 10 до 17.5 м [7]. Всего на озере шесть островов. В озеро впадают крупные реки: Бобровка, Кулешовка, Липовка и Пугачевка общей протяженностью 15.2 км. Вытекает только одна речка – Исток. Само по себе озеро очень живописно, по его берегам проложены пешеходные тропы. Котловина озера Тургояк тектонического происхождения. Площадь водной поверхности озера составляет 26.4 км<sup>2</sup>. Площадь водосбора составляет 476 км<sup>2</sup>, водосбор имеет протяженность с севера на юг 12.5 км, с востока на запад – 11 км. На территории водосбора расположено озеро Инышко, имеющее гидрологическую связь с Тургояком. Питание озера в основном обеспечивают грунтовые воды, реки и ручьи, впадающие в озеро. Питание всех водоносных горизонтов происходит путем инфильтрации атмосферных осадков [5]. Площадь акватории 2 638 га.

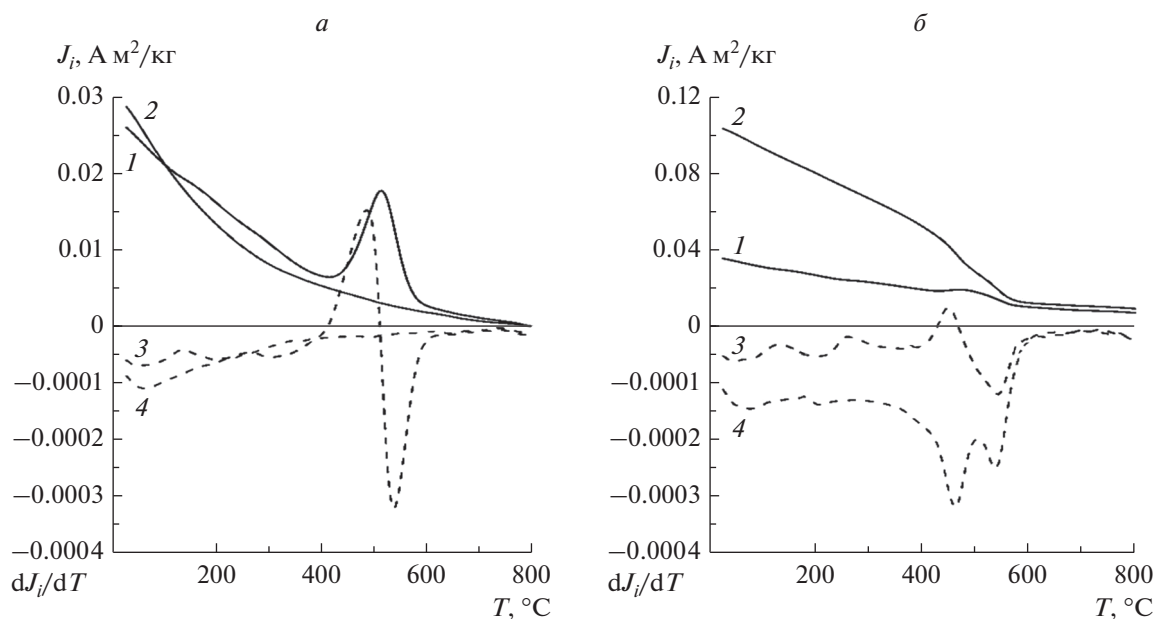
В рамках научных экспедиций 2016–2017 гг. проводились исследования осадков озер Южного Урала. На основе сейсмоакустического анализа были выявлены зоны ненарушенной стратификации осадков и наличия газопроявлений с целью определения наиболее подходящих мест для бурения [4]. На основе анализа временных разрезов были намечены точки отбора керна в центральной части каждого озера. Осуществлено бурение

5 керновых колонок донных отложений оз. Большой Кисегач (рис. 1а) и оз. Тургояк (рис. 1б) с использованием гидравлического керноотборника [1]. Длина отобранного керна донных отложений составила от 4 до 5.6 м. Из каждой керновой колонки проводился детальный отбор образцов с шагом 2 см для лабораторных исследований.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью подборки образцов для дальнейших электронно-микроскопических исследований магнитного сепарата осадочных отложений озер использовался дифференциальный термомагнитный анализ (ДТМА). ДТМА выполнялся на авторегистрирующих крутильных весах, сконструированных в ИГиНГТ [2, 3]. Нагрев каждого образца в магнитном поле 400 мТл проводился дважды при скорости нагрева 100°С/мин. Первоначально образец нагревали до температуры 800°С, затем остужали до комнатной температуры и снова нагревали до 800°С. В результате измерений были получены зависимости индуктивной намагниченности от температуры.

Магнитная сепарация начиналась с того, что сухие пробы осадка помещали в пластиковые контейнеры с шариком для взбалтывания, заливали дистиллированной водой и размещивали в течение 15 мин с использованием прибора для взбалтывания Vortex. После размочивания осадков в воде образовывалась однородная взвесь. В контейнер помещали изолированный магнит и исследуемые образцы снова размещивали в Vortex.



**Рис. 2.** Результаты дифференциального термомагнитного анализа образцов оз. Тургояк. Сплошная линия 1 – первый нагрев; линия 2 – второй нагрев; пунктирная линия 3 – дифференциал первого нагрева, пунктирная линия 4 – второго нагрева: а – образец 1311; б – образец 1121.

Далее из контейнера извлекали магнит, и прилипшую к нему в процессе взбалтывания магнитную фракцию смывали в чашку Петри. Затем магнитную фракцию многократно диспергировали в ультразвуковой ванне и промывали дистиллированной водой с целью отделения породы от магнитной фракции. Полученный магнитный сепарат заливали спиртом.

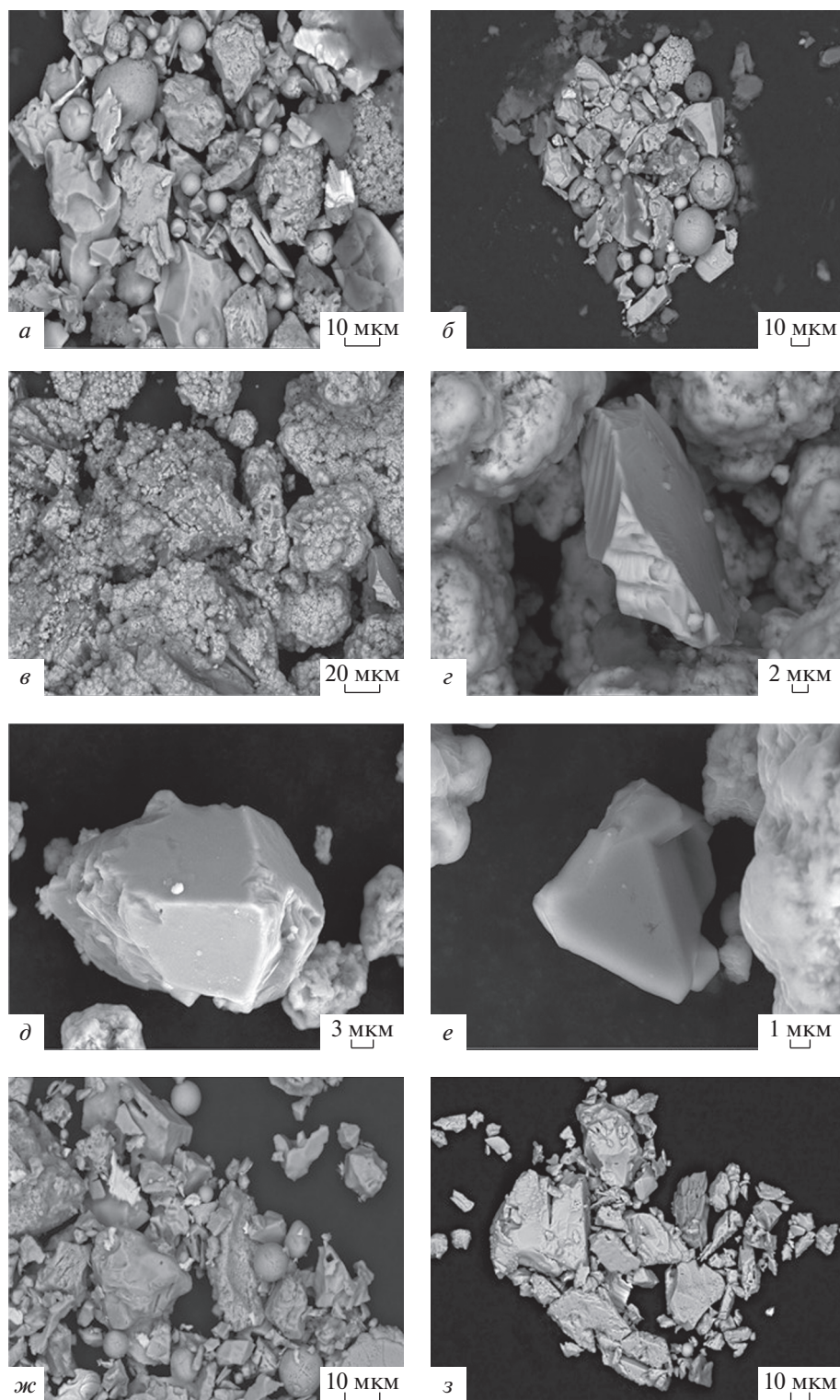
Для изучения магнитной фракции образцов использовали автоэмиссионный сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) Merlin (Carl Zeiss). Зафиксированные на держателе пробы магнитного сепарата помещали в камеру электронного микроскопа и проводили зондирование выбранных участков. Съемку образцов проводили в режиме детектирования отраженных электронов при ускоряющем напряжении 20 кэВ с целью выявления фазового контраста. Микроскоп оснащен энергодисперсионным спектрометром AZtec X-MAX. Разрешение спектрометра – 127 эВ. Элементный анализ проводили при ускоряющем напряжении 20 кэВ и рабочем отрезке 9 мм, что позволило избежать минимальных погрешностей. Глубина зондирования составляла 1 мкм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Методом ДТМА изучено 100 образцов по двум озерам. Поведение термомагнитных кривых свидетельствует о присутствии в образцах различных магнитных минералов, таких как пирит, сидерит, магнетит, гематит, железо-никелевые сплавы

(рис. 2). Образцы с наличием магнетита (температурный эффект примерно при 570°C) и железо-никелевых сплавов (температура Кюри выше 700°C) были отобраны для дальнейшего изучения с целью определения вклада космического вещества в магнитную фракцию осадка.

На основе микрофотографий и элементного анализа с использованием высокоточной сканирующей электронной микроскопии установлено, что детритовая компонента ферромагнитной фракции озера Большой Кисегач образца 328 (глубина 60 см) представлена крупными аллотигенными зернами магнетита, хромистого магнетита, низкотитанистого магнетита и другими ферромагнитными минералами. Примеры изображений показаны на электронно-микроскопических снимках на рис. 3а, 3б. В образце 551 детритовая компонента ферромагнитной фракции представлена сульфидами железа (рис. 3в), железом (Fe более 90%) с примесью Сг 0.7% (рис. 3г), низкотитанистым магнетитом (рис. 3д), хромистым магнетитом (рис. 3е). Данные элементного состава исследуемых образцов представлены в табл. 1. Помимо этого, данная компонента включает в себя сферулы космического происхождения. Размер сферул варьируется от 3 до 25 мкм. По химическому составу частицы соответствуют магнетиту. Исследуемые образцы представляют особый интерес, так как большое количество таких сферул могло быть привнесено в бассейн осадконакопления как при падении метеоритного тела и сго-



**Рис. 3.** Электронно-микроскопические снимки магнитного сепарата: образец 328 (глубина 60 см) оз. Большой Кисегач – аллотипные зерна магнетита, хромистого магнетита, низкотитанистого магнетита и другие ферромагнитные минералами (а, б); образец 551 (глубина 506 см) – сульфиды железа (в), железо с примесью Cr (z), низкотитанистый магнетит (д), хромистый магнетит (е). Образец 1141 (глубина 96 см) оз. Тургойк – обломочные зерна оксида железа с примесями Cr, Ni, Ti, V (ж); образец 1214 (глубина 242 см) крупные обломочные зерна размером до 75 мкм оксида железа с примесями Cr, Ti, V (з).

**Таблица 1.** Элементный состав исследуемых образцов (ат. %)

	Fe	C	O	Mg	S	Cr	Si	Другие элементы
Кисегач 328 (спектр 28)	15.85	10.30	54.81	4.74	—	0.06	7.12	7.12
Кисегач 551 (спектр 8)	42.27	19.08	29.18	—	3.34	0.61	0.22	5.30
Тургояк 1141 (спектр 20)	53.05	15.65	10.37	0.28	—	12.51	1.35	6.79
Тургояк 1214 (спектр 7)	42.19	51.69	3.29	0.18	—	0.07	0.69	1.89

рании его в атмосфере, так и в результате повышенной вулканической активности.

Изучение магнитного сепарата оз. Тургояк методом СЭМ было проведено для керновой колонки № 5. Магнитная фракция образца 1141 озера Тургояк с глубины 96 см представлена как крупными частицами, достигающими 50 мкм, так и значительно более мелкими (рис. 3ж). Крупные обломочные зерна представлены оксидами железа с примесями Cr, Ni, Ti, V, а также со значительным содержанием Cr. Помимо этого, наблюдаются кристаллы титаномагнетита с высоким содержанием Ti. Магнитная фракция образца 1214 (глубина 242 см) также представлена крупными и значительно более мелкими частицами (рис. 3з). Крупные обломочные зерна размером до 75 мкм представлены оксидами железа с примесями Cr, Ti, V. Наблюдаются кристаллы титаномагнетита с высоким содержанием Ti. В обоих образцах присутствует значительное количество сферул. Структура поверхности и состав позволяет предположить их космогенное происхождение.

### ВЫВОДЫ

Аллоитогенный магнитный материал оз. Большой Кисегач и Тургояк схож по составу, что вполне закономерно, учитывая их близкое расположение и единообразие источников сноса терригенного материала. Выбор образцов для исследований методом СЭМ на основе термомагнитного анализа, является весьма обоснованным, так как позволяет отобрать образцы с наличием внеземного вещества. Показано, что состав аллоитогенной магнитной фракции озер весьма разнообразен. Здесь присутствуют частицы, привнесенные с питающих озера провинций, представленные оксидами железа с примесями Cr, Ni, Ti, V и сульфидами

железа, и из космического пространства, представленные магнетитовыми сферами и железом с примесью Cr. Выявлены горизонты с повышенным количеством магнетитовых сферул, которые являются продуктами абляции метеоритов. Такие горизонты в будущем можно будет использовать в качестве своеобразных реперных слоев.

Работа выполнена при поддержке грантами РНФ № 18-17-00251 и РФФИ № 17-05-01246. Работы Косаревой Л.Р. выполнены за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности 5.3174.2017/4.6.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Борисов А.С.* Система технологического обеспечения палеомагнитных исследований отложений современных озер. Автореф. дис. ... докт. геол.-минерал. наук. Казань: КГУ, 2004. 46 с
2. *Буров Б.В., Ясонов П.Г.* Введение в дифференциальный термомагнитный анализ горных пород. Казань: изд-во КГУ, 1979. 159 с.
3. *Буров Б.В., Нургалеев Д.К., Ясонов П.Г.* Палеомагнитный анализ. Казань: Изд-во КГУ, 1986. 167 с.
4. *Крылов П.С.* Сейсмоакустика донных отложений современных озер как основа палеогеофизических и палеоклиматических реконструкций. Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Казань: КФУ, 2018. 24 с.
5. <http://www.redbook.ru/article569.htm>
6. *Гаврилкина С.В.* Минерализация озер восточного склона Южного Урала // Изв. Самар. НЦ РАН. 2014. Т. 16. № 3. С. 1.
7. *Сементовский В.* Тургояк. Озеро – памятник природы и окрестности: Сб. материалов: стихи, науч. ст. Челябинск: Рифей, 1993. С. 12.