

УДК 550.4:543.427.4:548.732:621.384.665

## ПОИСК ГОДИЧНО СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ДОННЫХ ОСАДКОВ В ОЗЕРАХ ГОРНОГО АЛТАЯ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО МИКРОАНАЛИЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2019 г. А. В. Дарьин<sup>1, \*</sup>, И. А. Калугин<sup>1</sup>, В. В. Бабич<sup>1</sup>, Т. И. Маркович<sup>1</sup>, А. М. Грачев<sup>2</sup>,  
Ф. А. Дарьин<sup>3</sup>, Я. В. Ракшун<sup>3</sup>, Д. С. Сороколетов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

\*E-mail: avd@igm.nsc.ru

С использованием микро-РФА на пучках синхротронного излучения из накопителя ВЭПП-3 проведены исследования образцов донных осадков озера Кучерлинское, содержащих тонко ламинированные слои. Образцы с визуально видимыми слоями были приготовлены в виде твердых препаратов, пропитанных эпоксидной смолой. Процедура подготовки образцов позволяла сохранить исходную структуру и состав осадка. Сканирующий рентгенофлуоресцентный микроанализ образцов проводился на экспериментальной установке в ЦКП “Сибирский центр синхротронного и терагерцевого излучения” (ИЯФ СО РАН, Новосибирск). Были получены профили сканирования с шагом 100 и 200 мкм, содержащие данные о распределении более чем 20 порообразующих и микроэлементов. Экспериментальный материал использован для подтверждения годичной природы найденной слоистости осадков, оценки скорости и построения литолого-геохимической модели процесса осадконакопления.

DOI: 10.1134/S0367676519020108

### ВВЕДЕНИЕ

Образование донных осадков (как морских, так и озерных) происходит в условиях меняющейся внешней среды, оказывающей влияние на вещественный состав и структуру донных отложений. При традиционных методах исследования проводится нарезка керн на дискретные образцы с шагом 5–10 мм. Это ограничивает временное разрешение анализа и детальное исследование состава отдельных годовых слоев, что является важной задачей для оценки скорости и моделирования процессов осадкообразования.

Используя сканирующий микро-РФА на пучках синхротронного излучения можно уменьшить шаг опробования до 10–100 мкм, что позволяет строить временные ряды литолого-геохимических как с годовым, так и сезонным временным разрешением.

Объектом исследования в данной работе являлось высокогорное озеро Кучерлинское (Алтай) осадки которого содержат ежегодно ламинированные слои (варвы). В российской литературе для таких осадков используется термин “ленточные глины” — отложения приледниковых озер, состоящие из чередующихся слоев тонкозернистого песка и

глины — продукты осаждения ледниковой мути. Необходимо отметить, что ежегодно ламинированные осадочные последовательности рассматриваются мировым палеоклиматическим сообществом как один из важнейших палеоархивов [1], поскольку в этом случае исследователи получают возможность точной временной привязки. Отдельные годовые слои образуются сезонными поставками взвешенных частиц, в случае ледниковых озер источниками которых являются водные потоки таяния ледников. Слоистость в осадке обусловлена неравномерным привносом обломочного материала в разные сезоны года (песчанистые — летом, глинистые — зимой). Слои состоят из крупных частиц (песка, ила) и мелкозернистой глины, осаждающейся в зимний период.

Использование синхротронного излучения для рентгенофлуоресцентного анализа (микроРФА-СИ) донных осадков имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами. Первые предложения по использованию СИ в качестве чрезвычайно яркого источника рентгеновского излучения для исследований появились в 1970х годах: первые эксперименты с СИ здесь были проведены еще в 1973 г. [2]. Работы по сканирующему микроана-

**Таблица 1.** Параметры сканирования исследуемых образцов кернов

Керн	Энергия возбуждения, кэВ	Размеры пятна возбуждающего излучения (мкм), высота–ширина	Шаг сканирования (мкм) по высоте керна
Кучерла 2018-2	19.5	100–500	100
Кучерла 2018-2	19.5	200–500	200
Кучерла 2018-2	23	1000–2000	1000

лизу геологических (в том числе осадочных) образцов были начаты в конце 1980-х годов [3, 4] и продолжены в серии работ по исследованию озёрных донных отложений в последующие годы.

В отличие от метода РФА с рентгеновской трубкой (XRF), метод РФА-СИ позволяет снизить предел обнаружения в 10–100 раз и определять в несколько раз больше элементов. Уникальные возможности РФА СИ обусловлены непрерывным спектром и малой угловой расходимостью СИ, его естественной поляризованностью и чрезвычайно высокой яркостью [2]. В настоящее время метод специально адаптирован для палеоклиматических задач, разработаны и аттестованы методики подготовки и исследования кернов донных осадков [5, 6]. В последние годы развитие получил вариант метода с использованием фокусирующей рентгеновской оптики – поликапиллярных линз [7–9]. При этом пространственное разрешение анализа достигает 10 мкм, что позволяет проводить детальные исследования отдельных годовых слоев в донных отложениях [10, 11].

Основной целью данного исследования являлось получение надежных аналитических данных о вариациях элементного состава в образцах современных донных осадков озера Кучерлинское для оценки скорости осадконакопления и построения модели годового цикла осадкообразования.

#### ОТБОР ПРОБ И ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ

Озеро Кучерлинское расположено у подножия северного склона Катунского хребта в верховьях реки Кучерла на высоте 1790 метров над уровнем моря. Длина озера 5 км, ширина – 1 км, максимальная глубина достигает 45 м. Озеро находится в труднодоступной местности и подвержено минимальному антропогенному воздействию, что делает его перспективным объектом для палеоклиматических исследований.

Керны осадков озера Кучерлинское были получены с использованием ящика-пробоотборника в 2009 и ударных трубок в 2018 гг. Для детального исследования были использованы образцы верхней части керна Куч\_2018-2, отобранного в самой глубокой части озера с глубины 45 м. Выбор образцов был обусловлен максимальными размерами визуально выделяемых слоев на по-

верхности исходного (влажного) керна. Подготовка образцов для анализа проводилась по методике, описанной в [5].

#### ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперименты выполнялись в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН в Сибирском центре синхротронного и терагерцевого излучения. Использовалась станция “Элементный анализ”, подробно описанная в работе [6]. Схематично станция состоит из системы коллимации и фокусировки пучка, детектора и сканирующего устройства, которое протягивает керн в вертикальном направлении с заданным шагом. Источником СИ служит накопитель ВЭПП-3 [12]. Как правило определяется не менее 20 элементов, при этом для большинства определяемых элементов предел обнаружения составляет от 1 до 5 г/т.

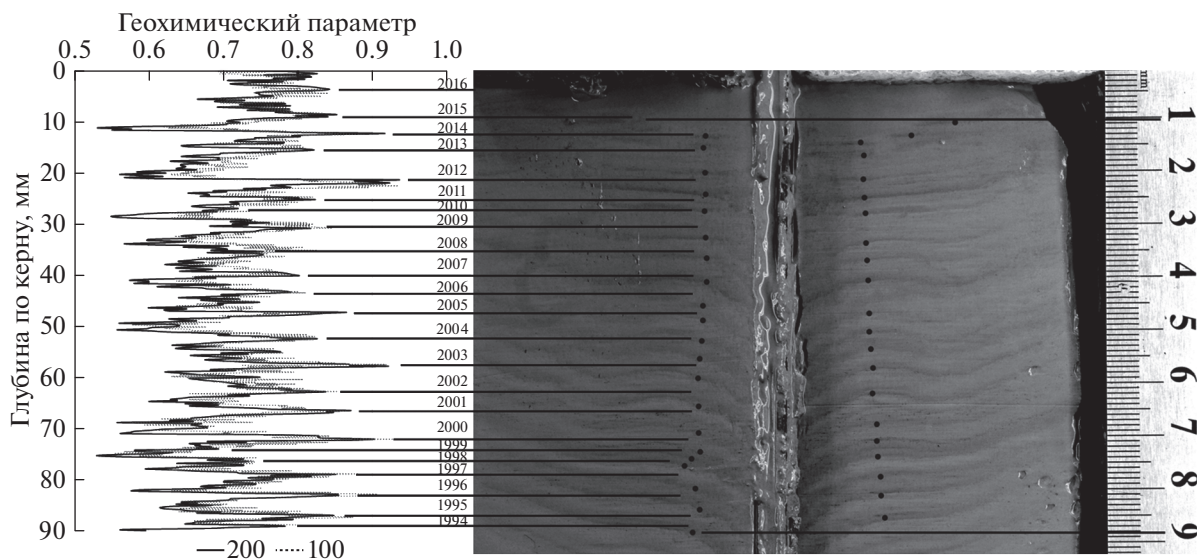
Были исследованы верхние 170 мм керна Кучерла2018-2 с шагом сканирования 100, 200 мкм и 1 мм. Параметры эксперимента представлены в табл. 1.

Аналитические сигналы, полученные в результате измерений, представляют собой площади пиков аналитов, выделенные из спектрограммы при помощи программы обработки сложных РФА-спектров (AXIL) [13], предназначенной для энергодисперсионного спектрометрического анализа. Определялись элементы: K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo по K-сериям и Pb, Th, U по L-сериям. Расчет содержания каждого элемента в пробе производился методом внешнего стандарта с использованием государственного стандартного образца состава БИЛ-1 (Байкальский ил, ГСО 7126-94) [14].

Содержания элементов привязаны к точкам измерений вдоль профиля сканирования от верха керна вглубь разреза.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для сопоставления полученных данных с визуально выделяемыми слоями профили сканирования были вынесены на фотографию поверхности исходного керна в одинаковом линейном масштабе. В качестве примера на рис. 1. представлены профили отношения содержания Rb/Sr, измеренные на интервале 0–90 мм с шагом 100 и 200 мкм.



**Рис. 1.** Справа – фотография поверхности исходного (влажного) керна, вскрытого вдоль оси отбора, в интервале 0 (верх осадка)–90 мм. Точками отмечены границы визуально выделяемых слоев. Слева – профили распределения отношения содержаний Rb/Sr, измеренные на интервале 0–90 мм с шагом 100 и 200 мкм.

На фотографии отчетливо выделяются чередующиеся светлые и темные слои. Если считать пары светлый–темный за один годовой слой, то визуально на фотографии влажного керна, вскрытого вдоль оси отбора, в интервале от 10 до 90 мм можно выделить 20–22 слоя. Профили распределения отношения содержаний Rb/Sr, измеренные на этом интервале с шагом 100 и 200 мкм хорошо совпадают друг с другом. Подсчет количества экстремумов в профилях сканирования также дает значение 20–22. Изменение химического состава донных осадков совпадает с визуальными изменениями его структуры.

Ранее проведенные нами исследования донных осадков пресноводных горных озер Телецкого [15] и Донгуз–Орон [10] показали, что в озерах с низким содержанием органического вещества отношение содержаний Rb/Sr обратно коррелирует с размерами частиц терригенного материала, поступающего в акваторию с территории водосбора с весенним паводком и летними дождями. Это связано с высокой интенсивностью процессов выветривания стронция из мелких частиц (<10 мкм) с более развитой поверхностью на единицу массы по сравнению с крупноразмерными частицами. В то время, как рубидий мало растворим в пресной воде, стронций выносится из частиц разного размера с различной скоростью, что приводит к повышению отношения Rb/Sr (за счет уменьшения содержания стронция) в мелко-размерных частицах относительно более крупных.

Если детально посмотреть на полученный профиль отношения содержаний Rb/Sr (рис. 2), то можно отметить асимметричность отдельных цик-

лов, что отражает динамику процесса сноса терригенного материала и поступления в осадок разных фракций.

Модель сезонного осадконакопления выглядит следующим образом. В период весеннего паводка и интенсивных летних дождей идет вброс терригенного материала в водоем. При этом крупноразмерные частицы быстро опускаются на дно и формируют начало нового годового слоя. Дифференциация остальных частиц идет в течение большого временного интервала и заканчивается зимой, когда вода в озере успокаивается после ледостава. Таким образом на слой крупноразмерных частиц, имеющих самое низкое Rb/Sr отношение, отлагаются слои с уменьшением размера частиц, следовательно, с более высокими значениями отношения Rb/Sr. Профиль отношения Rb/Sr внутри отдельного слоя отражает динамику весеннего паводка, интенсивность летних



**Рис. 2.** Профиль отношения содержаний Rb/Sr на интервале 10–30 мм, отражающий динамику годового цикла осадконакопления в модели гравитационной дифференциации материала терригенного сноса.

осадков и соотношение частиц терригенного материала различного размера.

Таким образом, как данные об элементном составе, так и структура керн донных осадков озера Кучерлинское подтверждают модель гравитационной дифференциации терригенного вещества в процессе годового цикла осадкообразования и позволяют использовать полученные данные для оценки линейной скорости накопления современных осадков. Для верхнего слоя (временной интервал последних десятилетий) эта величина составляет 3.6–4.0 мм · год<sup>-1</sup>.

### ВЫВОДЫ

Разработанный метод сканирующего микроРФА-СИ позволяет проводить детальные исследования элементного состава внутреннего строения отдельных годовых слоев в озерных донных осадках с высоким пространственным разрешением. Выполнены микроаналитические исследования образцов современных донных осадков ледникового озера Кучерлинское (Алтай). Построены профили распределения породообразующих и микроэлементов с шагом 100 и 200 мкм. Совмещение фотографических изображений поверхности керн с профилями сканирования позволило получить оценку скоростей современного осадконакопления путем подсчета годовых слоев, выделяемых визуальным и по геохимическим индикаторам.

На основе полученных данных могут быть построены временные модели глубина керн — возраст осадка для последних десятилетий, что позволит проводить количественные сравнения состава осадка с данными инструментальных метеонаблюдений. Подготовлен эмпирический материал, позволяющий строить модели годового цикла современного осадкообразования в исследованном ледниковом озере и вести поиск аналитических зависимостей состава донных осадков от погодно-климатических факторов с годовым (сезонным) временным разрешением.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 18-55-53016 и частично № 16-05-00647, № 16-05-00657 (исследование отдельных годовых слоев) с использованием оборудования ЦКП “СЦСТИ” на базе ВЭПП-3/ВЭПП-4М/НЛСЭ ИЯФ СО РАН, поддержанного Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62117X0012).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zolitschka B., Francus P., Ojala A.E.K., Schimmelman A.* // Quaternary Sci. Rev. 2015. V. 117. P. 1.
2. *Кулипанов Г.Н., Скринский А.Н.* // УФН. 1977. Т. 122. С. 369.
3. *Baryshev V.B., Gavrilov N.G., Zolotarev K.V. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 1989. V. 60. P. 2456.
4. *Daryin A.V., Baryshev V.B., Zolotarev K.V.* // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. Section A. 1991. V. 308. Issues 1–2. P. 318.
5. *Дарьин А.В., Калугин И.А., Ракишун Я.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 2. С. 204.
6. *Дарьин А.В., Ракишун Я.В.* // Научный вестник Новосибирского государственного техн. ун-та. 2013. № 2 (51). С. 112.
7. *Дарьин А.В., Ракишун Я.В.* // Научн. вестн. Новосибирского гос. технического университета. 2013. № 2 (51). С. 119–129.
8. *Darin F.A., Kalugin I.A., Darin A.V., Rakshun Ya.V.* // Acta Geologica Sinica. 2014. V. 88. № S1. P. 5.
9. *Сороколетов Д.С., Ракишун Я.В., Дарьин Ф.А.* // Автометрия. 2015. Т. 51. № 3. С. 94.
10. *Дарьин А.В., Ракишун Я.В., Сороколетов Д.С. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 1. С. 137.
11. *Дарьин А.В., Калугин И.А., Ракишун Я.В. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2015. Т. 79. № 1. С. 146.
12. *Piminov P.A. et al.* // Phys. Proc. 2016. V. 84. P. 19.
13. *Vekemans B., Janssens K., Vincze L. et al.* // X-ray Spectrometry. 1994. V. 23. issue 6. P. 278.
14. <http://www.igc.irk.ru/ru/component/flexicontent/188-standartnye-obraztsy-sostava/3430-standartnyj-obrazets-sostava-bajkalskogo-ila?Itemid=746>.
15. *Дарьин А.В., Калугин И.А., Ракишун Я.В.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 2. С. 210.