

УДК 550.4:543.427.4:548.732:621.384.665

## ПОСТРОЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ЛИТОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ В РАЗРЕЗЕ ДОННЫХ ОСАДКОВ ОЗЕРА КАРАКЕЛЬ ПО ДАННЫМ СКАНИРУЮЩЕГО МИКРО-РФА НА ПУЧКАХ СИНХРОТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ НАКОПИТЕЛЯ ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН

© 2019 г. А. В. Дарьин<sup>1</sup>, \*, М. Ю. Александрин<sup>2</sup>, А. М. Грачев<sup>2</sup>, О. Н. Соломина<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 ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

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

Керны донных осадков озера Каракель (Сев. Кавказ) были получены в 2010 и 2014 гг. для проведения геохимических исследований, направленных на построение региональных палеоклиматических реконструкций позднего голоцена. Образцы, изготовленные из твердых препаратов кернов донных отложений, были сканированы методом микро-РФА в ЦКП “Сибирский центр синхротронного и терагерцевого излучения” с шагом 1 мм с определением содержания более 20 элементов. Профили сканирования использовались для построения единого опорного разреза с корректировкой слоев осадка, датированных радиоуглеродным анализом, и создания временной модели глубина керна – возраст осадка.

DOI: 10.1134/S0367676519020091

### ВВЕДЕНИЕ

Непрерывные последовательности (разрезы) донных озерных отложений являются одним из наиболее полных и универсальных источников палеоклиматической информации. Геохимические индикаторы, отражающие вариации условий осадконакопления, позволяют создавать детальные непрерывные количественные реконструкции целого ряда параметров изменчивости среды. При этом горные озера могут содержать информацию, связанную с изменениями региональных ледниковых обстановок [1].

Первый отбор керна донных осадка озера Каракель был произведен в 2010 г. Результаты исследований опубликованы в 2013 и 2014 гг. [2, 3]. Дальнейшие исследования, однако, позволили выявить неточности существующей хронологии за счет получения новых кернов донного осадка в 2014 г.

Целью настоящей работы является создание единого опорного разреза с объединенной мастер-хронологией, основанной на радиоуглеродных датировках кернов 2010 и 2014 гг., и построение временных рядов литолого-геохимических данных, используемых для реконструкции основ-

ных тенденций климатической изменчивости в регионе в последние тысячелетия.

### МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Первые опыты применения сканирующего рентгенофлуоресцентного микроанализа с возбуждением синхротронным излучением для исследования распределения элементов в геологических образцах показали большую перспективность метода [4] в том числе для изучения морских осадочных последовательностей [5]. Впоследствии анализ широко применялся для исследования как морских, так и озерных донных осадков и в настоящее время все методики проведения измерений аттестованы [6, 7].

Образцы для исследований были приготовлены из твердых препаратов керна, пропитанных эпоксидной смолой. Измерения образцов проводились на станции “Локальный и сканирующий рентгенофлуоресцентный элементный анализ” ЦКП Сибирский центр синхротронного и терагерцевого излучения [8]. Источником СИ служит накопитель ВЭПП-3 [9]. Использовался монохроматичный пучок синхротронного излучения с

энергией 21 кэВ. Ширина пучка (поперек образца) составляла 10 мм, высота пучка (вдоль образца) 1 мм. Образец перемещался вертикально с шагом, совпадающим с высотой пучка. Время измерения в точке составляло от 10 до 25 с, в зависимости от загрузки спектрометрического тракта. Одновременно определялись содержания 25 породообразующих и микроэлементов: Cl, S, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo — по *K*-сериям, U и Th — по *L*-сериям. Кроме содержаний элементов проводилось измерение отношения интенсивностей упруго-/неупруго рассеянного на образце излучения, как потенциально климатически коррелированного параметра [10].

Все регистрируемые величины были геометрически привязаны к положению на шкале глубины керна в мм от верха (граница вода–осадок). Верх керна изначально датировался годом отбора и служил началом отсчета при построении временных рядов по актуальной модели глубина керна–возраст осадка.

#### ПОСТРОЕНИЕ ОПОРНОГО РАЗРЕЗА ПО ДАННЫМ МИКРО-РФА СКАНИРОВАНИЯ

Отбор образцов донных осадков в 2010 г. проводился с помощью поршневого озерного бура. Для того, чтобы поршень начал продвигаться в пробоотборной трубке, осадок должен быть достаточно плотным. В случае, когда верхняя часть осадка находится в полужидком состоянии, возможны потери верхней части керна. Изначальная работа над керном 2010-го года не предполагала значительных потерь верха — недостаточное количество радиоуглеродных датировок не позволило точно это установить. Таким образом, хронология, описанная в [2, 3] опиралась на предположение о том, что верхушка керна датируется 2010 г. Впоследствии, новые датировки, полученные для верхней части керна 2010 г., поставили под сомнение существующую возрастную модель и послужили предпосылками к предположению о том, что верхняя часть керна 2010 г. была потеряна в процессе отбора. Бурение верхнего керна в 2014 г. производилось без поршня, что исключало вероятность потери верхней слабо консолидированной части осадка.

Визуальное сравнение фотографий поверхностей вскрытых кернов показало наличие на глубине 20–30 мм в керне 2010 г. и на глубине 200–220 мм в керне 2014 г. характерного светлого слоя сопоставимой мощности. Возникшее предположение о потере верхней части осадка в керне 2010 г. было подтверждено сравнением профилей распределения породообразующих и микроэлементов в исследованных образцах.

Для прецизионного совмещения двух кернов и построения опорного разреза были использованы результаты сканирующего микро-РФА, полученные для разрезов 2010 и 2014 гг. Совмещение профилей сканирования показало хорошее совпадение маркирующих пиков для всех аналитических данных (рис. 1).

Итоговое удлинение верхнего керна с коэффициентом 1.17 и сдвиг относительно нижнего на 225 мм позволили объединить оба керна в один опорный разрез. Изменение размеров верхнего керна связано с тем, что отбор проводился в разных точках озера, где линейные скорости осадконакопления немного различаются. Но при этом текстура и состав кернов совпадают, а их изменения отражают реакцию системы седиментации озера в целом на изменение параметров внешней среды.

#### СОЗДАНИЕ ИТОГОВОЙ ВРЕМЕННОЙ МОДЕЛИ ГЛУБИНА КЕРНА–ВОЗРАСТ ОСАДКА

Для исследованных кернов был получен ряд датировок радиоуглеродного возраста, которые могут быть использованы для построения общей временной модели. Однако, прежде чем перейти к этой части исследования, необходимо провести общую оценку полученного аналитического материала для поиска возможных нарушений в процессе осадконакопления. Дело в том, что в непрерывных осадочных последовательностях возможны проявления событийных процессов — образование так называемых турбидитных слоев. Их появление связано с массовым вбросом терригенного материала вследствие паводков, селей, землетрясений, сходов лавин и т.д. Образование турбидитного слоя приводит к нарушению временной шкалы в осадочных разрезах и их необходимо убирать при построении модели глубина керна–возраст осадка.

Как правило событийные (одномоментные) слои отличаются по структуре и составу от основной части керна. Также критерием турбидитного интервала может быть характер распределения материала внутри слоя.

На рис. 1 видны два ярко выраженных слоя в интервалах 160–230 и 545–565 мм с резко повышенным содержанием большинства элементов, характерных для терригенного материала (K, Ti, Rb, Y, Zr, Nb). С большой вероятностью эти интервалы связаны с событийными вбросами большого количества терригенного материала. Детальное рассмотрение структуры этих слоев подтверждает наши предположения. На рис. 2 представлен профиль вариации отношения Sr/Rb для интервала 160–230 мм. Это типичный профиль, отражающий

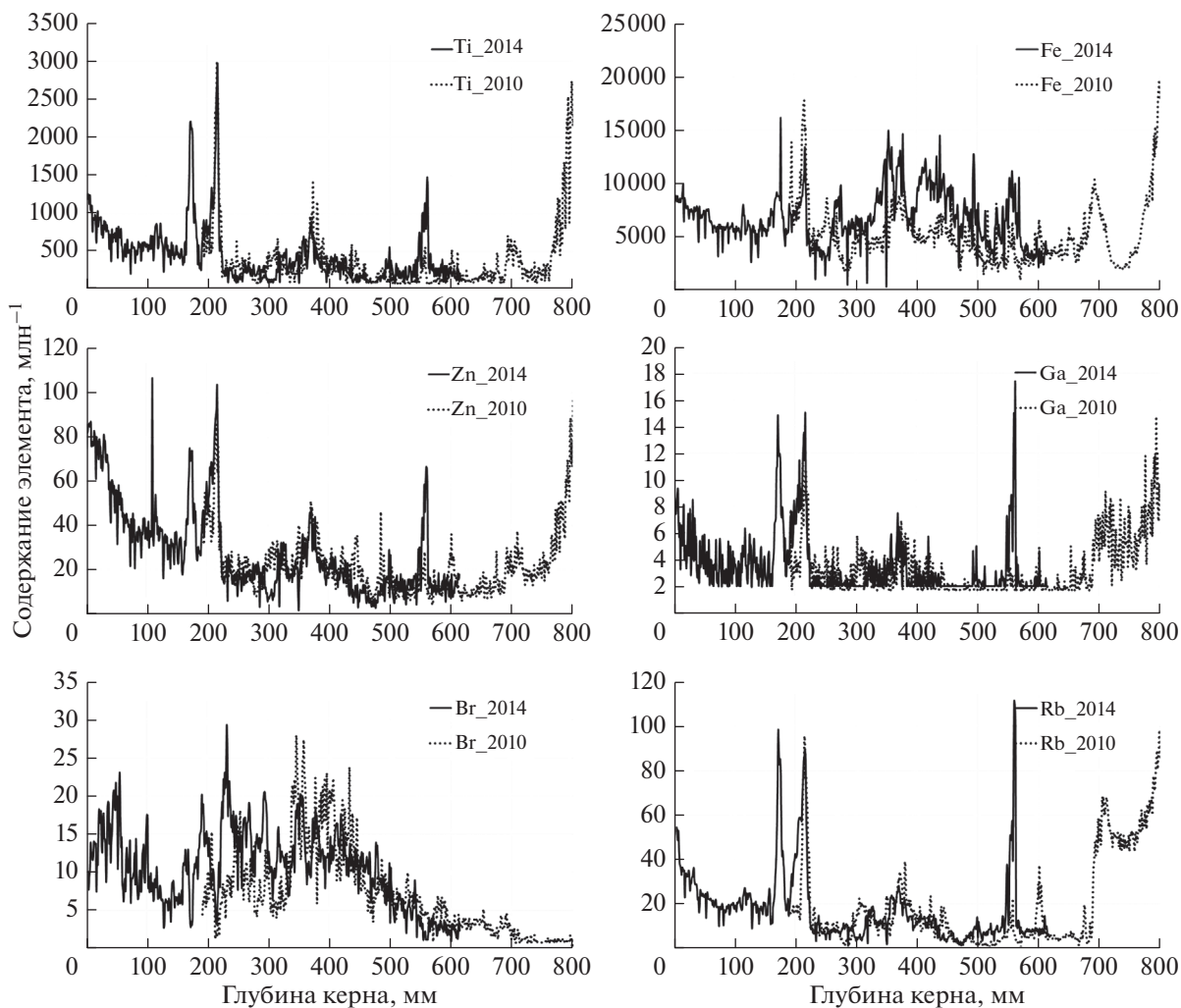


Рис. 1. Совмещение профилей сканирования кернов 2010 и 2014 гг. с корректировкой размеров верхнего керна в 1.17 раза.

гравитационную дифференциацию разноразмерных частиц после вброса материала в водоем. Можно выделить след первого (более мощного) селя (интервал 200–230 мм) и повторный сход терригенного материала (интервал 170–190 мм).

Изменения отношения Sr/Rb отражает изменение размера частиц терригенного материала, имеющих одинаковый исходный состав, но различную степень выветривания. Более крупные, слабо выветрелые частицы, имеют большее отношение Sr/Rb, чем мелкие, подвергшиеся большей степени выветривания. Крупные частицы первыми выпадают на дно бассейна, затем происходит плавное осаждение мелкозернистых частиц. Такая модель дифференциации вещества типична для горных озер и описана нами ранее [11, 12].

Вторым фактором в пользу событийного (однократного) происхождения рассматриваемых интервалов служит совпадение оценок возраста для образцов, взятых с глубин 180 и 210 мм. Радиоизо-

топный возраст для обеих глубин дает одинаковую оценку 640 лет, что логично, если это был одномоментный вброс вещества одного состава.

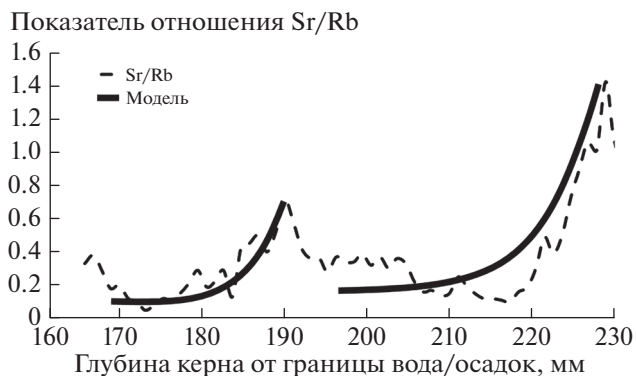


Рис. 2. Наблюдаемый и модельный профиль изменения отношения Sr/Rb для аномального слоя в интервале 160–230 мм, отражающий изменения размера частиц в процессе гравитационной дифференциации.

Таким образом, на основании данных микро-РФА есть основания удалить два аномальных интервала из опорного разреза донных осадков оз. Каракель.

После удаления двух турбидитных слоев из опорного разреза можно построить временную модель глубина керна—возраст осадка и пересчитать наборы литолого-геохимических индикаторов, построенные на миллиметровой шкале, во временные ряды.

### ВЫВОДЫ

Данные высокоразрешающего микро-РФА-СИ использованы для синхронизации двух разновозрастных кернов донных осадков озера Каракель. Сравнение полученных профилей распределения породообразующих и микроэлементов в кернах 2010 и 2014 гг. показало их хорошее совпадение при учете потерь верхней части керна 2010 г. что позволило построить единый опорный разрез.

Данные о микроэлементном составе (отношение Sr/Rb) были использованы для поиска интервалов осадка, отражающих одномоментные события вброса большего количества терригенного материала, что позволило уточнить временную модель глубина керна—возраст осадка и получить корректные временные ряды литолого-геохимических индикаторов.

Таким образом, сканирующий микро-РФА на пучках синхротронного излучения, применяемый для исследования озерных донных отложений, дает новую информацию о составе осадков, используемую для построения палеоклиматических реконструкций.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 17-35-50134 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. *Solomina O.N., Bradley R.S., Jomelli V. et al.* // *Quaternary Sci. Rev.* 2016. V. 149. P. 61.
2. *Соломина О.Н., Калугин И.А., Александрин М.Ю. и др.* // *Лед и снег.* 2013. № 2 (122). С. 102.
3. *Разумовский Л.В., Калугин И.А., Дарьин А.В. и др.* // *Вестн. Тюменского гос. ун-та. Экология и природопользование.* 2014. № 4. С. 67.
4. *Baryshev V.B., Gavrilov N.G., Zolotarev K.V. et al.* // *Rev. Sci. Instrum.* 1989. V. 60. № 7. P. 2456.
5. *Daryin A.V., Baryshev V.B., Zolotarev K.V.* // *Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. Section A.* 1991. V. 308. № 1–2. P. 318.
6. *Дарьин А.В., Ракишун Я.В.* // *Научн. вестн. Новосибирского гос. техн. ун-та.* 2013. № 2 (51). С. 112.
7. *Дарьин А.В., Ракишун Я.В.* // *Научн. вестн. Новосибирского гос. техн. ун-та.* 2013. № 2 (51). С. 119.
8. *Дарьин А.В., Калугин И.А., Ракишун Я.В.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2013. Т. 77. № 2. С. 204.
9. *Piminov P.A. et al.* // *Phys. Proc.* 2016. V. 84. P. 19.
10. *Дарьин А.В., Гольдберг Е.Л., Калугин И.А. и др.* // *Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исслед.* 2003. № 12. С. 53.
11. *Дарьин А.В., Александрин М.Ю., Калугин И.А., Соломина О.Н.* // *ДАН.* 2015. Т. 463. № 5. С. 602.
12. *Дарьин А.В., Ракишун Я.В., Сороколетов Д.С. и др.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2015. Т. 79. № 1. С. 137.