

УДК 550.4, 543.427.4, 548.732, 621.384.665

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ГОДОВЫХ СЛОЕВ В ДОННЫХ ОСАДКАХ ПРЕСНОВОДНЫХ ОЗЕР МЕТОДОМ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОГО МИКРОАНАЛИЗА С ВОЗБУЖДЕНИЕМ СИНХРОТРОННЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ[#]

© 2019 г. А. В. Дарьин^{1, *}, В. В. Бабич¹, И. А. Калугин¹, Т. И. Маркович¹, Д. Ю. Рогозин^{2, 3},
А. В. Мейдус⁴, Ф. А. Дарьин⁵, Я. В. Ракшун⁵, Д. С. Сороколетов⁵

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии имени В.С. Соболева
Сибирского отделения Российской академии науки, Новосибирск, Россия

²Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук — обособленное подразделение
Федерального государственного бюджетного научного учреждения Федеральный исследовательский центр
“Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук”, Красноярск, Россия

³Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования
“Сибирский федеральный университет”, Красноярск, Россия

⁴Государственный природный заповедник “Тунгусский”, Россия

⁵Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера
Сибирского отделения Российской академии науки, Новосибирск, Россия

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

Поступила в редакцию 15.04.2019 г.

После доработки 20.06.2019 г.

Принята к публикации 27.07.2019 г.

В осадках озера Кучерлинское (Алтай) показана возможность выделения границ слоя по литолого-геохимическим индикаторам (отношению Rb/Sr). На основе данных сканирующего рентгенофлуоресцентного микроанализа с использованием синхротронного излучения и изотопных исследований найден след Тунгусского события 1908 г. в керне донных осадков озера Заповедное, расположенного в сорока километрах от эпицентра взрыва. Образование аномального слоя в озерных донных осадках связано с усилением процессов терригенного сноса на территории водосбора из-за массового вывала леса и последующих пожаров. Показана возможность целенаправленного поиска микрочастиц внеземного происхождения в датированном слое донных отложений.

DOI: 10.1134/S0367676519110085

ВВЕДЕНИЕ

Детальные геохимические исследования отдельных годовых слоев (т.н. “варв”) в ежегодно ламинированных донных осадках континентальных озер необходимы для моделирования процессов сезонного осадкообразования и установления связи с изменяющимися внешними условиями. При этом, изменение внешних условий может происходить с разной скоростью и иметь различные причины, в том числе и катастрофические. Были выбраны два объекта исследований, расположенных в Центрально-Азиатском регионе — озеро Кучерлинское (Алтай) и озеро Заповедное (Эвенкия). Изучали верхние интервалы осадка, содержащие слои, датируемые последними десятилетиями.

Для озера Кучерлинское неизвестны современные катастрофические события, способные существенно повлиять на процессы осадкообразования. Динамика осадконакопления для этого объекта будет зависеть от погодно-климатических изменений. Для второго объекта зафиксировано точно датированное катастрофическое событие. 30 июня 1908 г. в районе Подкаменной Тунгуски произошел мощный взрыв, наиболее вероятной причиной которого считается падение космического тела, вещество которого не было обнаружено. Достаточно информативные обзоры проведенных исследований позволяют оценить, как масштабы работ, так и количество гипотез о причинах происшедшего [1].

Работы последних лет показали, что применение современных методов микроанализа позволяет получить новые данные о составе рассеянных по поверхности металлических частиц (шариков) и обломков с высокобарическими минералами им-

[#] Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на международной конференции по генерации и использованию синхротронного излучения “SFR-2018”.

пактного происхождения, которые могут рассматриваться как остатки взвешенного вещества [2, 3]. Однако процедуры и места сбора микрочастиц являются определяющими для интерпретации полученных результатов. Поэтому выделение точно датированного слоя в донных отложениях может дать новый исследовательский материал.

В настоящей работе представлены результаты исследований образцов кернов донных осадков с отдельными годовыми слоями, полученные с использованием методик аналитической микростратиграфии (сканирующий рентгенофлуоресцентный микроанализ с использованием синхротронного излучения – сканирующий РФА СИ) [4].

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ПРОБООТБОР, ПРОБОПОДГОТОВКА

Приледниковое озеро Кучерлинское находится на территории республики Алтай недалеко от высшей точки – горы Белуха. Длина озера до 5 км, ширина 1 км. Отбор кернов в марте 2018 г. проводился ударной трубкой с глубины 45 м.

Озеро Заповедное находится на территории Государственного природного Заповедника “Тунгусский” (Красноярский край) примерно в 40 км от эпицентра взрыва Тунгусского космического тела (ТКТ). Это небольшое пресноводное озеро длиной около 1 км, шириной до 400 м, имеет максимальную глубину до 45 м. Отбор кернов осуществляли со льда ударной трубкой в центральной части озера с глубины 40 м.

В процессе отбора особое внимание было уделено сохранности верхушек кернов, поскольку это необходимо для точной датировки. Керны транспортировали в вертикальном положении, в условиях, исключающих перемешивание верхних, слабо консолидированных слоев осадка. Из половины каждого керна были взяты пробы длиной 170 мм, используемые для непрерывного сканирования по методике [5], вторая половина нарезана с шагом 10 мм с получением набора дискретных проб. Детально процедуры пробоподготовки, проводимые в полевых условиях, описаны в работе [6].

После доставки в ИГМ СО РАН (Новосибирск) в лабораторных условиях из проб для сканирования были приготовлены твердые препараты путем лиофильной сушки и пропитки эпоксидной смолой [4], а дискретные пробы высушены и использованы для проведения дальнейших исследований, в том числе для определения физико-химических свойств осадка и изучения распределения изотопов ^{137}Cs и ^{210}Pb , необходимого для датировки верхних слоев.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Сканирующий микроанализ

Измерения проводились в ЦКП “Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения” по аттестованной методике [5]. Шаг сканирования был равен вертикальному размеру пучка возбуждающего излучения, и для разных экспериментов составлял 0.1–1 мм.

Энергию возбуждения 23 кэВ использовали для определения более 20 порообразующих и микроэлементов (K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Th, U) в каждой точке сканирования. Одновременно регистрировали отношение упруго-/неупруго- рассеянного на образце возбуждающего излучения, как потенциально климатически зависимого сигнала [7]. Обработку РФА спектров проводили при помощи программы AXIL, пересчет площадей пиков в содержании проводили методом внешних стандартов по процедуре [5].

Изотопные исследования

Для оценки скорости осадконакопления в верхних слоях, перекрывающих временной интервал последнего столетия, были проведены измерения распределения активности изотопов ^{137}Cs и $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$. Измерения проводили в ИГМ СО РАН методом полупроводниковой низко-фоновой гамма-спектрометрии [8]. Полученные профили распределения радиоизотопов для керна Зап-1 приведены на рис. 1а.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Во всех полученных кернах визуально наблюдается наличие тонкой слоистости, что свидетельствует об отсутствии волнового перемешивания и биотурбации донных осадков. Профиль распределения $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ удовлетворительно аппроксимируется экспоненциальной функцией, а распределение ^{137}Cs имеет четко выраженный максимум, маркирующий глобальные выпадения после испытаний ядерного оружия 1961 г. [9]. Эти данные также указывают на постоянные условия седиментации и позволяют строить возрастные модели из оценок средней скорости осадконакопления для исследуемого интервала.

Для образцов озера Кучерлинское был выбран интервал, содержащий визуальные слои толщиной более 1 мм (рис. 2). На фотографии оптического шлифа выделяются пары чередующихся темных и светлых слоев. Изменения отношения Rb/Sr совпадают с изменениями его структуры. Полученные данные позволяют построить геохимическую модель сезонного осадкообразования в озерах приледникового типа. Профиль отношения Rb/Sr внутри отдельного годового слоя отра-

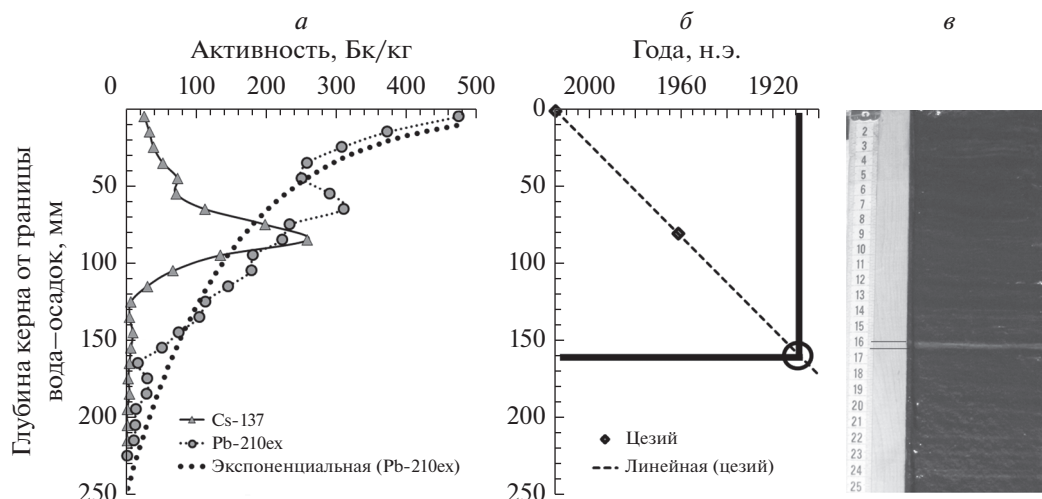


Рис. 1. а – Профили активности изотопов цезий-137 и свинец-210 в керне Зап-1. б – Временная модель с оценкой возраста маркирующего слоя на глубине 160 мм. в – Фото поверхности вскрытого керна Зап-1.

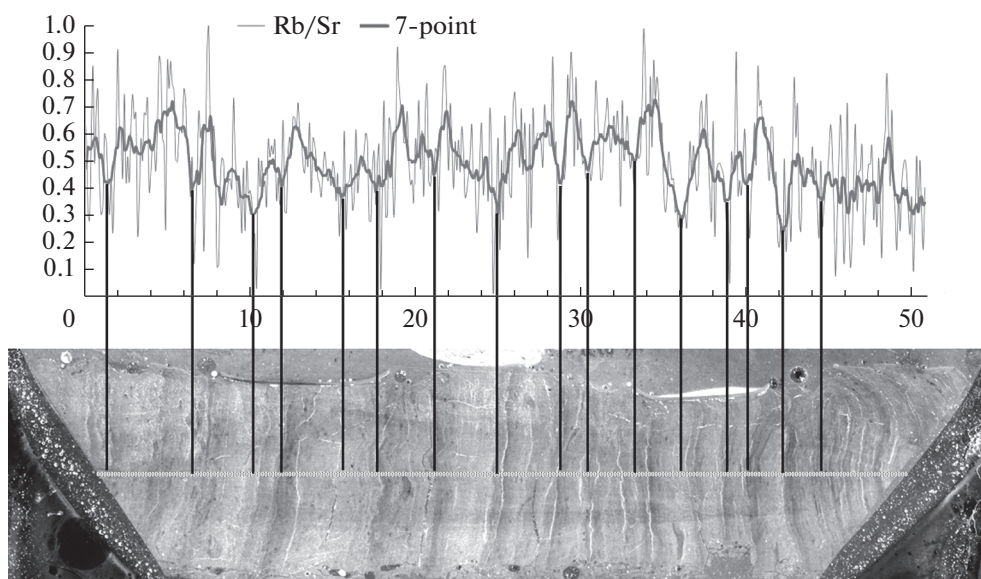


Рис. 2. Нормированное Rb/Sr отношение вдоль профиля сканирования образца Куч-2, совмещенное с фотографией оптического шлифа. Энергия возбуждения 23 кэВ, шаг сканирования 0.1 мм. Экстремумы Rb/Sr отношения совпадают с границами визуальных слоев.

жает динамику весеннего паводка, интенсивность летних осадков и соотношение частиц терригенного материала различного размера [10].

В табл. 1 представлены оценки линейной скорости накопления осадков в керне Зап-1 для

Таблица 1. Оценка линейной скорости осадконакопления для верхних 200 мм керна Зап-1

Изотоп	Скорость_мин, мм/год	Скорость_макс мм/год
^{137}Cs	1.54	1.73
$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$	1.50	1.61

верхних 200 мм. Из полученных данных можно оценить среднюю линейную скорость осадконакопления в керне Зап-1 величиной 1.6 мм/год. Исходя из этой величины и предположения, что верх керна датируется годом отбора, можно построить простую возрастную модель глубина керна–возраст осадка (рис. 1б) как линейную зависимость.

В керне Зап-1 на фоне темноокрашенных глин с общей слабо выраженной тонкой слоистостью, наблюдается четко выраженный светлый слой толщиной 5–8 мм. Слой находится на глубине 160 мм от границы вода–осадок. Полученная возрастная модель позволяет оценить дату образова-

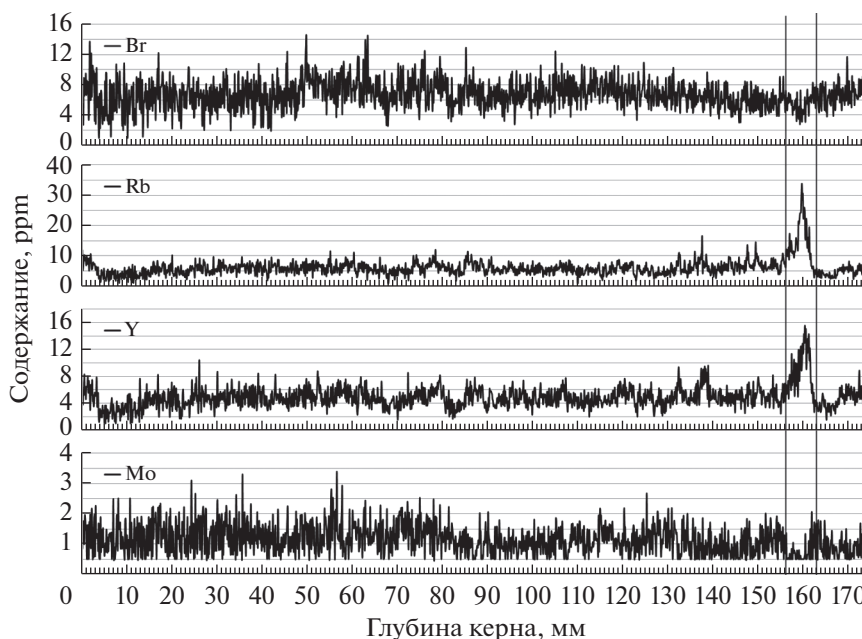


Рис. 3. Профили изменения содержаний ряда микроэлементов в керне Зап-1.

ния этого белого слоя 1908–1910 гг. и связать его образование со взрывом ТКТ.

Полученные данные показали, что в маркирующем слое наблюдается аномальное содержание ряда породообразующих и микроэлементов (рис. 3). При этом повышенное содержание наблюдается для элементов, характеризующих терригенный материал, поступающий в озеро с территории водосбора (K, Ti, Rb, Y, Zr). Резкое повышение содержания этих элементов в белом слое свидетельствует об усиленном терригенном сносе. С большой степенью вероятности можно утверждать, что это след сейсмического события и кислотных дождей, спровоцировавших повышенный снос терригенного материала, обусловленных взрывом ТКТ в 1908 г. Вывал леса на огромной территории и последовавшие за взрывом пожары привели к нарушению задерживающей способности почвы, что явилось причиной увеличения смыва материала с территории водосбора. Повышения содержания терригенного материала в донных осадках привело к относительному уменьшению доли органогенной компоненты, что выразилось в отрицательных аномалиях в содержаниях таких элементов, как Br, Zn, Mo и ряде других. Полученные данные позволяют уточнить модель сезонного осадконакопления в озерах таежной зоны и точно определить временной интервал, соответствующий 1908 г.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН при поддержке грантами РФФИ № 19-04-00320 (пробоотбор и пробоподготовка) и № 18-55-53016 (методики микроанализа), 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. Григорян С.С., Ибодов Ф.С., Ибодов С.И. // Вестник РФФИ. 2009. № 1–2(61–62). С. 56.
2. Vannucchi P., Morgan J.P., Lunga D.D. et al. // Earth Planetary Sci. Lett. 2015. V. 409. P. 168.
3. Kvasnytsya V., Wirth R., Dobrzhinetskaya L. et al. // Planetary Space Sci. 2013. V. 84. P. 131.
4. Дарьин А.В., Калугин И.А., Ракишун Я.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2013. Т. 77. № 2. С. 204; Darin A.V., Kalugin I.A., Rakshun Ya.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2013. V. 77. № 2. P. 182.
5. Дарьин А.В., Ракишун Я.В. // Научн. вестн. НГТУ. 2013. № 2(51). С. 119.
6. Rogozin D.Yu., Darin A.V., Kalugin I.A. // Dokl. Earth Sci. 2017. V. 476. № 2. P. 1226.
7. Дарьин А.В., Гольдберг Е.Л., Калугин И.А. и др. // Поверхность. Рентген., синхротрон. и нейтрон. иссл. 2003. № 12. С. 53.
8. Gavshin V.M., Sukhorukov F.V., Bobrov V.A. et al. // Water Air Soil Pollution. 2004. V. 154. № 1–4. P. 71.
9. Appleby P.G. // Holocene. 2008. V. 18. № 1. P. 83.
10. Дарьин А.В., Калугин И.А., Бабич В.В. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2019. Т. 83. № 2. С. 243; Darin A.V., Kalugin I.A., Babich V.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2019. V. 83. № 2. P. 194.