

УДК 551.79.551.89 54.062

СЛЕДЫ ТУНГУССКОГО СОБЫТИЯ 1908 г. В ДОННЫХ ОСАДКАХ ОЗЕРА ЗАПОВЕДНОЕ ПО ДАННЫМ СКАНИРУЮЩЕГО РФА-СИ

© 2020 г. А. В. Дарьин¹, Д. Ю. Рогозин^{2,3,*}, А. В. Мейдус⁴, В. В. Бабич¹, И. А. Калугин¹, Т. И. Маркович¹, Я. В. Ракшун⁵, Ф. А. Дарьин⁵, Д. С. Сороколетов⁵, А. А. Гогин⁶, Р. А. Сенин⁶, академик РАН А. Г. Дегерменджи²

Поступило 13.03.2020 г.
После доработки 25.03.2020 г.
Принято к публикации 03.04.2020 г.

В донных отложениях озера Заповедное, расположенного в 60 км от эпицентра Тунгусской катастрофы 1908 г., обнаружен слой, содержащий повышенные концентрации ряда химических элементов, являющихся индикаторами поступления в озеро вещества терригенного происхождения. Возраст слоя, оцененный радиоизотопными методами, соответствует времени данной катастрофы. Образование аномального слоя в озерных донных осадках, вероятно, связано с усилением процессов смыва терригенного вещества с территории водосбора из-за массового вывала леса и последующих пожаров, явившихся результатом Тунгусской катастрофы. Тем самым показана возможность целенаправленного поиска микрочастиц внеземного происхождения в обнаруженном датированном слое донных отложений.

Ключевые слова: Тунгусское космическое тело, донные осадки, рентгенофлуоресцентный анализ, синхротронное излучение, микроэлементы

DOI: 10.31857/S2686739720060043

30 июня 1908 г. в районе Подкаменной Тунгуски произошел мощный взрыв, наиболее вероятной причиной которого считается падение Тунгусского космического тела (ТКТ). Однако, годы поисков не привели к обнаружению ни места падения (кратера), ни обломков (метеоритных остатков). Достаточно информативные обзоры проведенных исследований позволяют оценить как масштабы работ, так и количество гипотез о причинах происшедшего [1].

В последние десятилетия исследования по поиску вещества ТКТ направлены на поиск и ана-

лиз микрочастиц, образовавшихся во время высотного взрыва. Применение современных методов микроанализа позволяет получить новые данные о составе рассеянных по поверхности металлических частиц (шариков) и обломков с высокобарическими минералами импактного происхождения, которые могут рассматриваться как остатки внеземного вещества [2, 3]. Однако выбранные места поиска и процедуры сбора микрочастиц являются определяющими для интерпретации полученных результатов.

В настоящей работе авторы представляют результаты исследования элементного состава слоев, датированных временным интервалом 1908–10 гг., в донных осадках озера Заповедное, по данным сканирующего рентгенофлуоресцентного анализа на пучках синхротронного излучения (микро РФА-СИ) [4].

Озеро Заповедное находится на территории ГПЗ “Тунгусский” в Эвенкийском автономном округе примерно в 60 км от эпицентра взрыва ТКТ. Это пресноводное озеро округлой формы диаметром около 350 м и максимальной глубине 56 м. Отбор кернов осуществлялся со льда в марте 2015 г. ударной трубкой в центральной части озера вблизи точки с координатами 60°31.699' с.ш. 101°43.648' в.д., глубина в точке отбора составила ~47 м. Были получены три керна длиной 380 (Зап1),

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Россия

³ Сибирский Федеральный Университет, Красноярск, Россия

⁴ Государственный природный заповедник “Тунгусский”, Красноярск, Россия

⁵ Институт ядерной физики им. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

⁶ Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

*E-mail: rogozin@ibp.ru

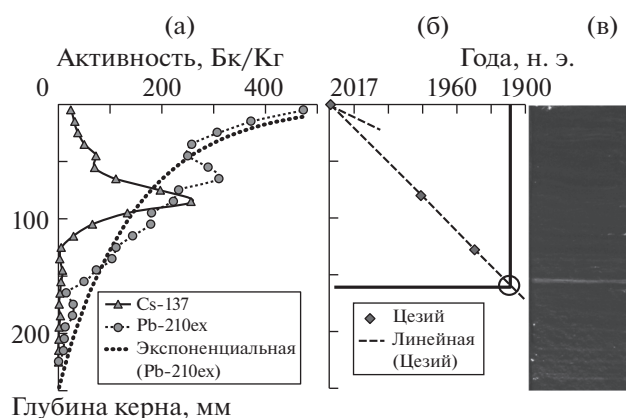


Рис. 1. (а) профили активности изотопов цезий-137 и свинец-210 в керне Зап-1. (б) возрастная модель (глубина керна—возраст слоя осадка) с оценкой возраста маркирующего слоя на глубине 160 мм в 1908–10 гг. (в) фото поверхности влажного керна Зап-1 с выделяющимся светлым слоем, мощностью до 5 мм, на глубине 160 мм от границы вода—осадок (фото сделано в полевых условиях).

540 (Зап3) и 1120 (Зап2) мм. Керны транспортировались на берег в вертикальном положении, в условиях, исключающих перемешивание слабоконсолидированных слоев осадка.

В полевых условиях трубы с кернами разрезали вдоль оси отбора и разделяли пополам на две продольные D-секции. Во всех кернах визуально

наблюдается тонкая слоистость, что свидетельствует об отсутствии волнового перемешивания и биотурбации донных осадков. В кернах наблюдалось наличие визуально выделяемого светлого слоя мощностью до 8 мм. В керне Зап-1 маркирующий слой находился на глубине 160–165 мм от неповрежденной границы вода—осадок (рис. 2в). В керне Зап-2 в процессе отбора было потеряно сверху около 150 мм и светлый слой был на глубине 25–30 мм. В керне Зап-3 потери были менее значимы, маркирующий слой находился на глубине 95–100 мм.

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) 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 изучения распределения изотопов ^{137}Cs и ^{210}Pb , необходимого для датировки верхних слоев. Для дальнейших аналитических исследований были выбраны образцы, приготовленные из кернов Зап-1 и Зап-3. Выбор был обусловлен тем, что в керне Зап-1 наличие неповрежденной границы

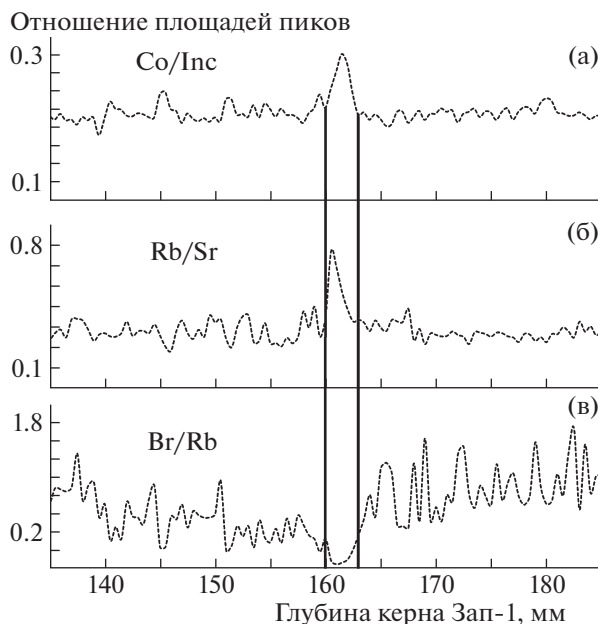


Рис. 2. Отношения площадей аналитических пиков в РФА спектрах образцов керна Зап-1 в интервале 140–180 мм от границы вода—осадок. Слой 1908–10 гг. находится в интервале глубин 160–165 мм и отмечен большей плотностью (отношение упруго-неупруго рассеянного на образце излучения Co/Inc), повышенным содержанием терригенного материала (Rb/Sr-отношение) и пониженным содержанием органического вещества (Br/Rb-отношение).

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

Изотоп	Скорость min, мм/год	Скорость max мм/год
^{137}Cs	1.54	1.73
$^{210}\text{Pb}_{\text{exe}}$	1.50	1.61

Таблица 2. Отношение содержаний породообразующих и микроэлементов в слоях 1908–1910 гг. над средними для верхних интервалов кернов Зап-1 и Зап-3

	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Nb
Зап-1	3.9	2.3	2.9	1.8	2.0	1.4	1.3	5.0	3.1	3.3	4.3	6.5
Зап-3	4.7	2.4	3.6	2.1	1.9	1.5	1.7	5.2	3.5	3.5	4.7	5.4

вода–осадок позволяло датировать верхний слой годом отбора и строить максимально точную возрастную модель глубина керна–возраст слоя осадка. В керне Зап-3 визуально наблюдаемые повреждения верхних слоев были минимальными, потери составляли не более 60–70 мм.

Измерения твердых образцов донных осадков методом сканирующего микро РФА-СИ проводились в синхротронных центрах ИЯФ СО РАН (<https://ssrc.biomml.org/#!>) и КИСИ-Курчатов (<http://kcsni.nrcki.ru/>) по аттестованной методике [5].

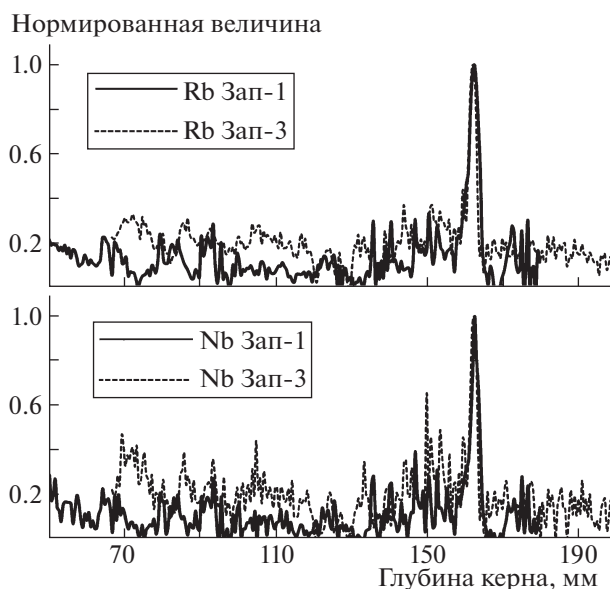
Для микро-РФА-СИ была использована монокроматическая энергия возбуждения в 23 кэВ с временем измерения в каждой точке 100 с, что

позволяло получить статистически достоверную информацию о содержаниях более 20 породообразующих 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 регистрировалось отношение упруго/неупруго рассеянного на образце возбуждающего излучения (Co/Inc). Шаг сканирования, совпадающий с вертикальным размером пучка возбуждающего излучения, составлял 0.5 мм.

Для оценки скорости осадконакопления в последние десятилетия были проведены измерения распределения активности изотопов ^{137}Cs и $^{210}\text{Pb}_{\text{exe}}$ по глубине керна Зап-1. Измерения проводились в ИГМ СО РАН методом полупроводниковой гамма-спектрометрии [7]. Полученные профили распределения радиоизотопов приведены на рис. 1а.

Профиль распределения $^{210}\text{Pb}_{\text{exe}}$ удовлетворительно аппроксимируется экспоненциальной функцией, а распределение ^{137}Cs имеет четко выраженный максимум, маркирующий глобальные выпадения после испытаний ядерного оружия на Новоземельском полигоне в октябре 1961 г. [8], что позволяет строить возрастную модель из оценок средней скорости осадконакопления для исследуемого интервала (табл. 1).

Оценив среднюю линейную скорость осадконакопления в керне Зап-1 величиной 1.6 мм/год, и учитывая, что верх керна датируется годом отбора, можно построить временную модель глубина керна–возраст осадка (рис. 1б) как линейную зависимость. В керне Зап-1 наблюдается четко

**Рис. 3.** Сравнение минимакс нормализованных отношений содержаний Rb и Nb в слое 1908–1910 гг. и вышележащих слоев в кернах Зап-1 и Зап-3 на шкале глубин керна Зап-1.

выраженный светлый слой толщиной 5–8 мм на глубине 160–165 мм от границы вода–осадок (рис. 1в). Полученная возрастная модель датирует этот слой 1908–1910 гг., что позволяет связать его образование со взрывом ТКТ.

Данные сканирующего микроанализа показали, что в слое 1908–1910 гг. наблюдаются как повышенные, так и пониженные содержания ряда породообразующих и микроэлементов (рис. 2).

Сравнение распределения содержаний анализируемых элементов в ядрах Зап-1 и Зап-3 показывает наличие общих тенденций и близких численных показателей. Добавка к ядру Зап-3 потерянному в процессе пробоотбора верхнего интервала 0–67 мм дает полное совпадение в химическом составе слоя 1908–1910 гг. (рис. 3), что свидетельствует о региональном характере выявленных зависимостей.

При этом повышенные содержания (табл. 2) наблюдаются для элементов, характеризующих терригенный материал, поступающий в озеро с территории водосбора (K, Ti, Rb, Y, Zr, Nb). Резкое повышение содержаний этих элементов в белом слое свидетельствует об усиленном терригенном сносе. Можно предположить, что это след катастрофического события, связанного со взрывом ТКТ 30 июня 1908 г. Вывал леса на огромной территории и последовавшие за взрывом пожары привели к нарушению задернованности почвы, что явилось причиной увеличения смыва материала с территории водосбора. Повышение содержания терригенного материала в донных осадках привело к относительному уменьшению доли органической компоненты, что выразилось в отрицательных аномалиях в содержаниях таких элементов, как Вг, Мо, U и ряде других.

Ранее итальянскими авторами в окрестности эпицентра Тунгусской катастрофы 1908 г. (500 м к северо-востоку от оз. Чеко) были проведены исследования вертикальных распределений ряда химических элементов (включая те, которые измерялись нами в настоящей работе: Ti, Fe, K, Ca, Mn, Cu, Zn, Ni, Br) рентгенофлуоресцентным методом в торфяной колонке. Однако в слоях, датированных авторами 1908–1910 гг., не было обнаружено никаких заметных аномалий элементного состава [9]. Вероятно, закономерности поступления, накопления и миграции элементов в торфянике отличались от таковых в отложениях оз. Заповедное. В первую очередь это связано с тем, что в районе эпицентра взрыва, ударная волна шла вертикально вниз. Поэтому вывал леса в этом районе не наблюдался (были обрублены ветки, стволы деревьев остались) и нарушения задернованности были значительно меньше. По этой же причине в профиле донных отложений оз. Чеко слой 1908–1910 гг., определенный согласно нашей датировке на глубинах 37–47 см [6], не выде-

ляется по литолого-геохимическим характеристикам [10].

Полученные данные позволяют сделать вывод о точной локализации временного интервала, соответствующего взрыву ТКТ 1908 г., в слоях донных осадков озер региона. Таким образом появляется возможность проведения целенаправленного поиска возможных следов вещества внеземного происхождения в виде микрочастиц в датированных слоях донных отложений. Для этого необходимо получить большее количество материала и провести процедуры по выделению и сепарации микрочастиц в разных слоях донного осадка. На имеющемся материале можно провести поиск микрочастиц аномального состава (повышенные отношения Ni/Fe и содержания Ge и МПГ) методом двумерного микро-РФА-сканирования с использованием фокусирующей рентгеновской оптики.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН при поддержке грантов РФФИ № 19–04–00320 и № 19–05–50046. В работе использовалось оборудование ЦКП “СЦСТИ” на базе УНУ “Комплекс ВЭПП-4–ВЭПП-2000” в ИЯФ СО РАН, поддержанное проектом RFMEFI62119X0022.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорян С.С., Ибодов Ф.С., Ибодов С.И. // Вестник РФФИ. 2009. № 1–2 (61–62). С. 56–71.
2. Vannucchi P., Morgan J.P., Lunga D.D., Andronico C.L., Morgan W.J. // Earth and Planetary Science Letters. 2015. V. 409. P. 168–174.
3. Kvasnytsya V., Wirth R., Dobrzhinetskaya L., Matzel J., Jacobsen B., Hutcheon I., Tappero R., Kovalyukh M. // Planetary and Space Science. 2013. V. 84. P. 131–140.
4. Дарьин А.В., Калугин И.А., Ракиун Я.В. // Известия РАН. Серия физическая. 2013. Т. 77. № 2. С. 204–206.
5. Дарьин А.В., Ракиун Я.В. // Научный вестник НГТУ. 2013. № 2 (51). С. 119–129.
6. Rogozin D.Yu., Daryin A.V., Kalugin I.A., Melygunov M.S., Mejdus A.V., Degermendzhi A.G. // ДАН. 2017. Т. 476. № 6. С. 685–687. <https://elibrary.ru/item.asp?id=30267866>
7. Gavshin V.M., Sukhorukov F.V., Bobrov V.A., Melgunov M.S., Miroshnichenko L.V., Kovalev S.I., Romashkin P.A., Klerkx J. // Water, Air, & Soil Pollution. 2004. T. 154. № 1–4. С. 71–83.
8. Appleby P.G. // The Holocene. 2008. V. 18. № 1. P. 83–93.
9. Tositti L., Mingozzi M., Sandrini S., Forlani L., Buoso M.C., De Poli M., Cecatto D., Zafiroopoulos D. // Global and Planetary Change. 2006. V. 53. P. 278–289.
10. Gasperini L., Bonatti E., Albertazzi S., Forlani L., Accorisi C.A., Longo G., Ravaoli M., Alvisi F., Polonia A., Sacchetti F. // Terra Nova. 2009. V. 21. № 6. P. 489–494.

TRACES OF “TUNGUSKA 1908” EVENT IN SEDIMENTS OF LAKE ZAPOVEDNOYE ACCORDING TO SR-XRF DATA

**A. V. Darin^a, D. Y. Rogozin^{b,c,#}, A. V. Meydus^d, V. V. Babich^a, I. A. Kalugin^a, T. A. Markovich^a,
Ya. V. Rakshun^e, F. A. Darin^e, D. S. Sorokaletov^e, A. A. Gogin^f,
R. A. Senin^f, and Academician of the RAS A. G. Degermendzhi^b**

^a *Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

^b *Institute of Biophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation*

^c *Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation*

^d *Federal Nature Reserve “Tungusskiy”, Krasnoyarsk, Russian Federation*

^e *Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

^f *National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: rogozin@ibp.ru*

The anomalous layer enriched with elements of terrigenous origin was detected by SR-XRF in sediment core of Lake Zapovednoye located at 60 km from the epicenter of “Tunguska Event 1908”. The age of the layer as determined by radio-isotopic measurements corresponds to 1908. We suggest that the layer was formed due to flushing the terrigenous matter resulted from extensive fires and uprooted trees resulted from “Tunguska 1908” explosion. Thus, we have shown the possibility of a targeted search for substance of extraterrestrial origin in the discovered dated layer.

Keywords: Tunguska Event 1908, lake sediments, X-ray fluorescent analysis (XRF), synchrotron radiation (SR), micro-elements