

## **КРИПТОТЕФРА В ОЗЕРНО-БОЛОТНЫХ ОСАДКАХ БОЛЬШОГО КАВКАЗА**

**Е.А. Мазнева<sup>1</sup>, Е.А. Константинов<sup>1</sup>, В.В. Пономарева<sup>2</sup>, М.В. Портнягин<sup>3</sup>, Е.А. Зеленин<sup>4</sup>,  
М.Ю. Александрин<sup>1</sup>, А.А. Бердникова<sup>5</sup>, А.Л. Захаров<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт географии РАН, Москва, Россия, elena.mazneva@igras.ru,

<sup>2</sup> Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия,

<sup>3</sup> GEOMAR Helmholtz Center for Ocean Research Kiel, Киль, Германия,

<sup>4</sup> Геологический институт РАН, Москва, Россия

<sup>5</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

## **CRYPTOTEPHRA IN THE LACUSTRINE SEDIMENTS AND PEATS OF THE GREATER CAUCASUS**

**E.A. Mazneva<sup>1</sup>, E.A. Konstantinov<sup>1</sup>, V.V. Ponomareva<sup>2</sup>, M.V. Portnyagin<sup>3</sup>, E.A. Zelenin<sup>4</sup>,  
M.Yu. Aleksandrin<sup>1</sup>, A.A. Berdnikova<sup>5</sup>, A.L. Zakharov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS, Petropavlovsk- Kamchatsky, Russia

<sup>3</sup> GEOMAR Helmholtz Center for Ocean Research Kiel, Kiel, Germany;

<sup>4</sup> Geological Institute RAS, Moscow, Russia

<sup>5</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

**Введение.** В пределах Большого Кавказского хребта расположены активные эруптивные центры, представленные грандиозными сооружениями вулканов Эльбрус (5642 м) и Казбек (5047 м) и группой моногенных вулканов Кельского нагорья. Поскольку эти центры неоднократно проявляли активность в течение позднего плейстоцена - голоцена, они могут возобновить свои извержения и представлять опасность для плотно заселенных южных районов России и прилегающих государств. Для разработки долгосрочного прогноза вулканической активности в регионе необходимо детально реконструировать режим активности вулканов за последние тысячи лет.

Имеющиеся представления о позднеплейстоцен-голоценовой вулканической активности в пределах Большого Кавказского хребта основаны главным образом на изучении лав [18, 19, 20]. Эти исследования позволили выделить основные этапы в активности Эльбруса, Казбека и вулканических центров Кельского нагорья. Последние фазы активности, по данным этих авторов, начались на Эльбрусе <35, Казбеке <50, а на Кельском нагорье <30 тыс. лет назад. Сведения о продуктах недавней эксплозивной деятельности крайне скудны [14, 15, 16, 17]. Радиоуглеродные даты, полученные в разных разрезах по валовым образцам углей и палеопочв, позволили грубо оценить возраст нескольких тефр Эльбруса (7200-7500, 4600-5500 и ~2000 лет назад) и двух лахаров в долине р. Баксан (7200 и 5800-6000 лет назад), возможно связанных с извержениями Эльбруса [14, 15]. Упомянуты голоценовые шлаки и пемзы на Кельском нагорье, но их возраст неизвестен [16, 18]. Расшифровку детальной летописи молодых эксплозивных извержений региона затрудняет плохая сохранность горизонтов тефры в условиях высокогорья и низкая скорость седиментации вмещающих осадков из-за интенсивной эрозии.

Для получения более полной летописи извержений кавказских вулканов нами было предпринято изучение непрерывных озерных и торфяных осадочных архивов. Целью этих работ является поиск горизонтов тефры и криптотефры, т.е. горизонтов осадка, обогащенных пепловым материалом [7]. В процессе таких исследований, наряду с пеплами местных вулканов, могут быть идентифицированы и пеплы весьма удаленных источников [2]. Поскольку выпадение тефры происходит практически мгновенно, ее прослой образует изохрону, которая позволяет прямо коррелировать удаленные разрезы, опираясь на уникальность химического состава вулканического пепла для каждого отдельного извержения. Небольшие озера и торфяники представляют собой самые полные и непрерывные палеоархивы голоцена на Кавказе. Из-за непрерывного осадконакопления и

отсутствия эрозии, они сохраняют более полную и детальную летопись эксплозивных извержений вулканов, чем почвенно-пирокластический чехол подножий вулканов.

Современные аналитические методики (электронный микрозонд и LA-ICP-MS) позволяют с высокой точностью определять химический состав отдельных частиц тефры, выделенных из осадка. Возраст молодой тефры может быть определен по возрасту вмещающих осадков ( $^{14}\text{C}$ , ОСЛ), что открывает большой геохронологический потенциал для криптотефры. Изучение озерных и торфяных отложений, содержащих тефру и криптотефру, для установления летописи извержений, а также корреляции и датирования осадочных архивов широко применяется в Европе последние тридцать лет [в т.ч. 3, 6, 8, 10, 13]. На территории России до сих пор было проведено всего несколько исследований криптотефры, который позволили обнаружить на севере европейской части несколько исландских пеплов [5, 11, 12]. Исследования голоценовой криптотефры на юге европейской части России ранее не проводились.

**Объекты.** Нами были исследованы три керн – два из отложений озер Хуко и Хорлакель и один – из торфяника Кубус. Видимых горизонтов тефры ни в одном из кернов не обнаружено.

Озеро Хуко расположено в небольшой тектонической депрессии на одном из хребтов Западного Кавказа на границе Краснодарского края и Республики Адыгея (N 43.937762, E 39.803470) на расстоянии ~220 км от в. Эльбрус. Высота уреза озера 1744 м н.у.м. Длина озера ~ 260 м, ширина ~ 150 м. Керн, имеющий длину 2 м, был получен экспедицией Института географии РАН в 2016 году. По керну ранее было получено 7 радиоуглеродных AMS дат, построена возрастная модель и выполнен комплекс анализов [4]. Согласно датам, основание керн имеет возраст около 10,5 кал. тыс.л.

Озеро Хорлакель (N 43.493145, E 42.218746) расположено в горах Карачаево-Черкессии на склоне Передового хребта в междуречье рек Худес и Хурзук на высоте 2040 м н.у.м. и в 24 км к СЗ от западной вершины вулкана Эльбрус. Керн озера Хорлакель, имеющий длину 2,5 м, был отобран экспедицией Института географии РАН в 2017 году. По керну получено 12 радиоуглеродных дат, согласно которым возраст колонки составляет 1000-8000 кал. л.

Болото Кубус расположено в Дигорском ущелье на территории национального парка Алания (N 42.89368, E 43.57733) в ~100 км к ЮВ от Эльбруса и ~70 км к ЗСЗ от Казбека и Кельского нагорья. Это болото расположено в небольшой низине (200x100 м) в пределах седловины между горой Кубус и отрогом Главного хребта на высоте 2080 м н.у.м. Болото имеет скальные и каменистые берега, в него не впадает постоянных водотоков. Мощность торфяной залежи варьирует от 0,5 до 5,5 м. В наиболее глубоком участке сотрудниками отдела Палеогеографии четвертичного периода ИГ РАН в 2019 г. была пробурена скважина и отобран керн. Верхние 4 м керн представлены бурым сфагновым и осоковым торфом низкой степени разложения с включением фрагментов древесины. Нижние 1,5 м керн представлены органо-минеральным илом (гиттией) с прослоями торфа в верхней части, что говорит об озерных условиях осадконакопления. По колонке получено восемь  $^{14}\text{C}$  AMS дат в радиоуглеродной лаборатории Института географии РАН (совместно с Центром прикладных изотопных исследований Университета Джорджии, США). Согласно датам, торфяная часть разреза отвечает голоцену, а озерная гиттия – позднеледниковому этапу. Возраст основания колонки составляет около 16000 кал. л.

**Методика.** Поиск горизонтов криптотефры проводился по методике S.M. Davies [2] у S.P.E. Blockley [1]. Из всех кернов были отобраны непрерывные бороздовые пробы длиной по 10 см (Хуко, Хорлакель) и 5 см (Кубус) на предмет обнаружения криптотефры. Материал высушивался, определялась его сухая масса. Затем с целью удаления органического вещества образцы из керн Кубус прокаливались 4 ч в муфельной печи при температуре 550° С. Далее сухие образцы из всех кернов обрабатывались 20%  $\text{H}_2\text{O}_2$  с целью удаления органического вещества и промывались на сите 25 мкм (Хуко, Хорлакель) и 30 мкм (Кубус). С помощью плотностной сепарации в тяжелой жидкости ГПС-В выделялись легкая «криолитовая» фракция (2,3-2,5 г/см<sup>3</sup>) и тяжелая «базальтовая» фракция (>2,5 г/см<sup>3</sup>). Из

полученного осадка «риолитовой» фракции изготавливался микропрепарат (шлиф) на основе канадского бальзама. Для подсчета концентрации тефры в шлифы из керна Кубус добавлялись таблетки со спорами *Lycosporidium* [9]. При помощи поляризационного микроскопа с увеличением 100-400 крат производилась идентификация среди частиц легкой фракции вулканического стекла на основе их специфических свойств: формы, структуры, оптической изотропии, относительного показателя преломления, цвета. На основании этого первичного исследования для керна из озера Хуко было установлено два интервала (2-10 см и 20-30 см), обогащенные вулканическим стеклом. Из них были отобраны более дробные непрерывные пробы с шагом 1 см, на основании которых были установлены пики концентрации вулканического стекла в осадках.

Для некоторых образцов с высоким содержанием вулканического стекла были изготовлены шлифы на основе эпоксидной смолы и проведен микрозондовый анализ частиц пепла в институте GEOMAR (г. Киль, Германия) и определение в них микроэлементов в Университете г. Киль. Процесс пробоподготовки материала для этих шлифов аналогичен описанному выше, за исключением сжигания в муфельной печи при 550° С.

**Результаты.** Озеро Хуко. Частицы вулканического стекла были обнаружены в значительных концентрациях по всему керну – от 200 до 2500 частиц/грамм. Преобладают мелкие частицы размером 30-50 мкм. Максимум концентрации частиц приходится на верхнюю часть керна – интервал 10-30 см. Фоновое содержание частиц в интервалах 2-10 и 20-30 см изменяется от 200 до 1000 частиц/грамм. На этом фоне ярко выделяется пик концентрации в образце 22-23 см (610-1033 кал.л.н.), где содержание тефры составляет 3700 частиц на грамм. Такой ярко выраженный пик дает основания предполагать, что этому уровню соответствует вулканическое извержение. Также высокое содержание тефры отмечается в интервалах 3-4 см (> 1000 зерен/гр., 42-93 кал.л.н.), 10-20 см (> 2500 зерен/гр., 131-696 кал.л.н.), 40-50 см (> 2200 зерен/гр., 1142-2136 кал.л.н.), 90-100 см (>1700 зерен/гр., 3083-3962 кал.л.н.), 120-130 см (> 1400 зерен/гр., 4212-5531 кал.л.н.), 150-160 см (> 1200 зерен/гр., 5429-6778 кал.л.н.), 190-198 см (> 1100 зерен/гр., 8190-10120 кал.л.н.). К настоящему времени проведено микрозондовое и LA-ICP-MS изучение пепловых частиц из интервалов 3-4 и 21-22, 22-23, 23-24 см. По содержанию главных элементов стекла близки стеклам из голоценовой тефры Эльбруса, однако микроэлементный состав указывает на другой вулкан-источник этого пепла. Дополнительным указанием на принадлежность этой криптотефры удаленному источнику является отсутствие исторических сведений об извержениях вулканов Главного Кавказского хребта в последнюю тысячу лет.

Озеро Хорлакель. Изучение оптических шлифов с «риолитовой» фракцией показало, что в осадке наряду с мелкими вулканическими стеклами (30-50 мкм) присутствуют и крупные (до 300 мкм) пемзовидные и композиционные частицы (шлаки), включающие, наряду со стеклом, множество микрокристаллов в своей структуре. Концентрация вулканических частиц изменяется по колонке от нуля до очень высоких значений - 56 тыс. частиц/грамм. Пики концентрации приходятся на интервалы: 10-20 см (> 18000 зерен/гр., 1406-2324 кал.л.н.), 50-60 см (> 20000 зерен/гр., 2972-3515 кал.л.н.), 193-203 (> 56000 зерен/гр., 5108-5883 кал.л.н.), 213-223 см (> 17000 зерен/гр., 5923-6509 кал.л.н.).

В интервале 213-223 см (5923-6509 кал.л.н.) были обнаружены самые крупные частицы тефры. Анализы показали, что частицы представлены фрагментами пористых пород, в которых присутствуют высококремнистые стекла, близкие по составу голоценовой тефре Эльбруса. По всей видимости, данная тефра представляет собой продукт дробления вязкого лавового купола.

Кубус. К настоящему времени обработана верхняя торфяная часть керна (375 см). Количество вулканического пепла изменяется от 110 до 85 000 частиц на грамм. Присутствуют как прозрачные вулканические частицы, так и крупные шлаковые зерна с микрокристаллами. Размер частиц изменяется от 30 до 200 мкм, преобладают зерна размером 30-75 мкм. Пики концентрации вулканического стекла приходятся на следующие интервалы: 15-20 см (>4000 зерен/гр.,119-827 кал.л.н.), 40-45 см (>1900 зерен/гр.,655-1397 кал.л.н.), 70-

75 см (>2700 зерен/гр.,1598-3297 кал.л.н.), 114-116 см (>85000 зерен/гр.,4640-6319 кал.л.н.), 145-150 см (>8900 зерен/гр.,6770-7686 кал.л.н.), 165-170 см (>5900 зерен/гр.,7264-8267 кал.л.н.), 185-190 см (>3600 зерен/гр.,7876-8713 кал.л.н.), 210-215 см (>1900 зерен/гр.,8595-9114 кал.л.н.), 270-275 см (>3500 зерен/гр.,9237-9864 кал.л.н.), 295-300 см (>1700 зерен/гр.,9529-10144 кал.л.н.), 320-325 см (>1500 зерен/гр.,9838-10392 кал.л.н.).

По макроэлементному составу стекла интервала 114-116 (4640-6319 кал.л.н.) близки стеклам голоценовой тефры Эльбруса.

**Выводы.** Среди изученных кернов наиболее высокая концентрация тефры отмечается в торфянике Кубус, самая низкая – в озере Хуко. Для озера Хорлакель характерны средние значения концентрации вулканического пепла. Согласно полученным данным выделяется 7 интервалов с содержанием вулканического стекла от 1000 до 85 000 зерен: 1) в районе 100-800 кал.л.н. (Хуко и Кубус); 2) ~600-1300 кал.л.н. (Хуко и Кубус); 3) ~ 1100-3200 (Хуко, Хорлакель, Кубус); 4) ~3000-3900 кал.л.н. (Хуко и Хорлакель); 5) ~4200-6300 кал.л.н. (Хуко, Хорлакель, Кубус); 6) ~5400-7600 кал.л.н. (Хуко, Хорлакель, Кубус); 7) ~7200-10300 (Хуко и 6 интервалов в Кубусе). Дальнейшее химическое изучение вулканических частиц поможет установить их источник. Однако во всех трех кернах присутствует интервал с высоким содержанием вулканического пепла в районе 6000 кал.л.н. В кернах Кубус и Хорлакель к этому интервалу приурочена максимальная концентрация тефры, в Хуко - концентрация >1200 зерен/грамм. Несколько видимых горизонтов тефры на подножии Эльбруса были также отнесены примерно к этому времени [15], но количество горизонтов и дальность их разноса оставались неизвестными. Наши исследования позволили установить, что тефры этого эпизода активности Эльбруса распространялись на расстояние более 100 км. Мы надеемся, что дальнейшие исследования позволят нам определить количество эксплозивных извержений этого и других этапов активности Эльбруса и других вулканов Главного Кавказского хребта, а также выявить тефры удаленных вулканов и установить их источники.

Исследование выполнено при поддержке проекта РФФИ DFG № 20-55-12011.

Список литературы:

[1] Blockley S.P.E., Pyne-O'Donnell S.D.F., Lowe J.J., Matthews I.P., Stone A., Pollard A.M., Turney C.S.M., Molyneux E.G. A new and less destructive laboratory procedure for the physical separation of distal glass tephra shards from sediments // *Quaternary Science Reviews*. – 2005. – Vol. 24. – P. 1952–1960.

[2] Davies S.M. Cryptotephra: the revolution in correlation and precision dating // *Journal of Quaternary Science*. – 2015. – Vol. 30(2). – P. 114-130.

[3] Dugmore A.J., Larsen G., Newton A.J. Seven tephra isochrones in Scotland // *The Holocene*. – 1995. – Vol. 5. – P. 257-266.

[4] Grachev A.M., Novenko E.Y., Grabenko E.A., Alexandrin M.Y., Zazovskaya E.P., Konstantinov E.A., Shishkov V.A., Lazukova L.I., Chepurnaya A.A., Kuderina T.M. et al. The Holocene paleoenvironmental history of Western Caucasus (Russia) reconstructed by multi-proxy analysis of the continuous sediment sequence from Lake Khuko // *The Holocene*. – 2021. – Vol. 31(3). – P. 368-379.

[5] Haflidason H., Regnéll C., Pyne-O'Donnell S., Svendsen J.I. Extending the known distribution of the Vedde Ash into Siberia: occurrence in lake sediments from the Timan Ridge and the Ural Mountains, northern Russia // *Boreas*. – 2019. – Vol. 48. – P. 444-451.

[6] Lawson I.T., Swindles G.T., Plunkett G., Greenberg D. The spatial distribution of Holocene cryptotephra in north-west Europe since 7 ka: implications for understanding ash fall events from Icelandic eruptions // *Quaternary Science Reviews*. – 2012. – Vol. 41. – P. 57-66.

[7] Lowe, D.J. & Hunt, J.B. (2001). A summary of terminology used in tephra-related studies. In Juvigne, E.T. & Raynal, J-P. (Eds), *Tephra: Chronology, Archaeology*. Les Dossiers de l'Archeo-Logis. – 2001. –Vol. 1. – P. 17-22.

[8] Pyne-O'Donnell S. The taphonomy of Last Glacial-Interglacial Transition (LGIT) distal volcanic ash in small Scottish lakes // *Boreas*. – 2011. – Vol. 40. – P. 131-145.

[9] Stockmarr, J. *Tablets with Spores Used in Absolute Pollen Analysis* // *Pollen et Spores*. – 1971. – Vol. 13. – P. 615-621.

[10] Swindles G.T., Lawson I.T., Savov I.P., Connor C.B., Plunkett G. A 7,000-year perspective on volcanic ash clouds affecting Northern Europe // *Geology*. – 2011. – Vol. 39. – P. 887-890.

[11] Vakhrameeva P., Portnyagin M., Ponomareva V., Abbott P.M., Repkina T., N. A.. *Koutsodendris*

A., Pross J. Identification of Icelandic tephra from the last two millennia in the White Sea region (Vodoprovodnoe peat bog, northwestern Russia) // *Journal of quaternary science*. – 2020. – Vol. 35(4). – P. 493–504.

[12] Wastegård S., Wohlfarth B., Subetto D.A., Sapelko T.V. Extending the known distribution of the Younger Dryas Vedde Ash into northwestern Russia // *Journal of Quaternary Science*. – 2000. – Vol. 15(6). – P. 581–586.

[13] Wulf S., Hardiman M.J., Staff R.A., Koutsodendris A., Appelt O, Blockley S.P.E., Lowe J.J., Manning C.J., Ottolini L., Schmitt A.K. et al. The marine isotope stage 1-5 cryptotephra record of Tenaghi Philippon, Greece: Towards a detailed tephrostratigraphic framework for the Eastern Mediterranean region // *Quaternary Science Reviews*. – 2018. – Vol. 186. – P. 236–262.

[14] Богатиков О.А., Мелекесцев И.В., Гурбанов А.Г. и др. Катастрофическая плейстоценовая и голоценовая активность вулканического центра Эльбрус (Северный Кавказ, Россия): события и хронология по данным  $^{14}\text{C}$ , ЭПР и К-Аг датирования // *Вулканология и сейсмология*. – 2001. – №. 2. – С. 3–17.

[15] Богатиков О.А., Мелекесцев И.В., Гурбанов А.Г., Сулержицкий Л.Д., Катов Д.М., Пурига А.И. Радиоуглеродное датирование голоценовых извержений вулкана Эльбрус (Северный Кавказ, Россия) // *ДАН*. – 1998. – Т.363. – №2. – С. 219–221.

[16] Газеев В.М., Гурбанов А.Г., Лексин А.Б. и др. Плиоцен-четвертичные пеплы на территории Южного Федерального Округа (проблемы, парадоксы, идеи) // *Вестник Владикавказского научного центра*. – 2011. – №11(3). – С. 39–47.

[17] Краевая Т.С. Генетические типа плейстоцен-голоценовых и современных грубообломочных образований Эльбруса // *Вулканология и сейсмология*. – 1985. – №6. – С. 20–32.

[18] Лебедев, В.А., Вашакидзе, Г.Т., Арутюнян, Е.В., Якушев, А.И. Геохронология и особенности эволюции четвертичного вулканизма Кельского нагорья (Большой Кавказ) // *Геохимия*. – 2011. – №11. – С.1189–1215.

[19] Лебедев, В.А., Парфенов, А.В., Вашакидзе, Г.Т., Габарашвили, К.А., Чернышев, И.В., Тогоидзе, М.Г. Хронология магматической активности и петролого-минералогические характеристики лав четвертичного вулкана Казбек, Большой Кавказ // *Петрология*. – 2018. – №26(1). – С. 3–33.

[20] Лебедев, В.А., Чернышев, И.В., Чугаев, А.В., Гольцман, Ю.В., Баирова, Э.Д. Геохронология извержений и источники вещества материнских магм вулкана Эльбрус (Большой Кавказ): результаты К-Аг и Sr-Nd-Pb изотопных исследований // *Геохимия*. – 2010. – № 1. – С. 45–73.