

## Краткие сообщения

УДК 551.217+550.4(571.66)

DOI: 10.31431/1816-5524-2024-3-63-105-109

### КАЛЬДЕРА КРАШЕНИННИКОВА (ВОСТОЧНАЯ КАМЧАТКА): ВОЗРАСТ И МАГНИТУДА ИЗВЕРЖЕНИЯ

©2024 В.В. Пономарева<sup>1</sup>, Н.В. Горбач<sup>1</sup>, Е.А. Зеленин<sup>2</sup>,  
М.В. Портнягин<sup>3</sup>, А.Н. Рогозин<sup>1</sup>, О.В. Дирксен<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006

<sup>2</sup>Геологический институт РАН, Москва, Россия, 119017; e-mail: egorzelenin@mail.ru

<sup>3</sup>GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research, Киль, Германия, 24148

Поступила в редакцию 22.04.2024; после доработки 09.05.2024; принята в печать 25.09.2024

Полученные новые данные о составе пироклаستيку кальдеры Крашенинникова позволили связать с ней ранее изученный горизонт тефры Geys30, до последнего времени ошибочно приписывавшийся извержению в пределах кальдеры Гейзерной. Отложения пирокластических потоков извержения, приведшего к образованию кальдеры Крашенинникова, обнаружены на борту кальдеры и на южном берегу Кроноцкого озера, а его удаленная тефра — в отложениях Центральной Камчатской депрессии на расстоянии до 200 км от источника. Предыдущими исследованиями было установлено, что извержение этой тефры произошло около 30 тысяч лет. Теперь эту оценку возраста можно принять как для проксимальной пироклаستيку, так и для самой кальдеры Крашенинникова. Идентификация тефры кальдерообразующего извержения в удаленных разрезах позволяет оценить объем изверженной пироклаستيку как минимум в 13 км<sup>3</sup>, а магнитуду извержения в 6.1.

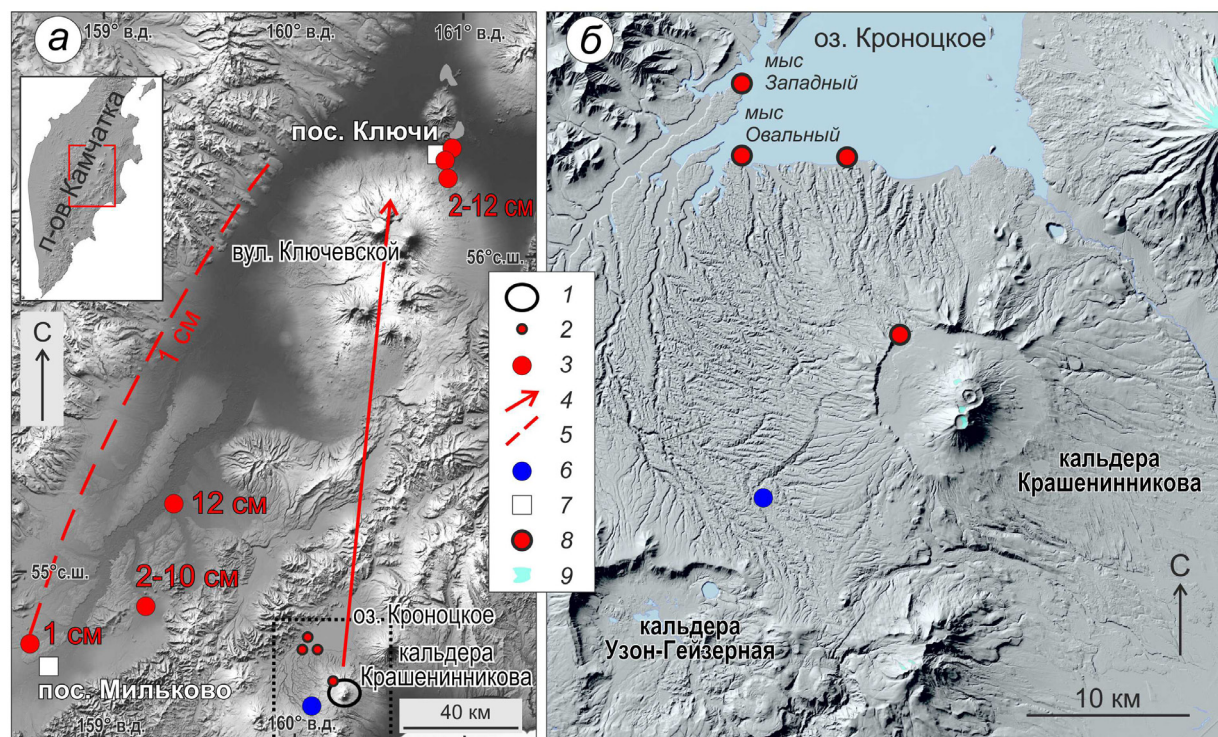
*Ключевые слова:* Восточная Камчатка, эксплозивное извержение, тефра, кальдера Крашенинникова.

### ВВЕДЕНИЕ

В ходе регионального исследования составов вулканических стекол в пирокластических продуктах крупнейших эксплозивных извержений Камчатки нами были изучены лапилли пемзы, отобранные Н.А. Ким в 2016 г. на южном берегу Кроноцкого озера (Portnyagin et al., 2020). Особенности химического состава вулканического стекла в данной пемзе (в частности, пониженное содержание калия) указывали на положение источника пемзы во фронтальной (наиболее близкой к Курило-Камчатскому глубоководному желобу) части Восточного вулканического пояса (Volynets, 1994). Ближайшим центром эксплозивной активности, с которым, по нашему мнению, можно было бы связать описываемую пемзу, является кальдера Крашенинникова (рис. 1). Но во время проведения регионального исследова-

ния считалось, что пирокластика кальдеры Крашенинникова характеризуется более высоким содержанием калия в вулканическом стекле, чем пемза с берега Кроноцкого озера (Portnyagin et al., 2020), поэтому в качестве источника для последней была предложена именно кальдера Гейзерная. Далее, при исследовании разрезов позднеплейстоценовых отложений в пределах Центральной Камчатской депрессии (ЦКД) была установлена тефра регионального распространения, по составу стекол идентичная пемзе южного берега Кроноцкого озера. Эта тефра также была отнесена к продуктам кальдеры Гейзерной и получила обозначение Geys30. С помощью радиоуглеродного датирования вмещающих тефру осадков возраст тефры был оценен в ~30 тысяч лет (Ponomareva et al., 2021).

В 2020–2022 гг. нам удалось провести опробование пироклаستيку на борту кальдеры



**Рис. 1.** Схема расположения обнажений, в которых была задокументирована пирокластика, связанная с кальдерой Крашенинникова (а) и ее увеличенный фрагмент (б): 1 — кальдера Крашенинникова; 2–3 — положение изученных разрезов отложений кальдерообразующего извержения: 2 — пирокластических потоков, 3 — тефры; 4 — предполагаемая ось пеплопада; 5 — примерное положение изопакиты 1 см для тефры Крш; 6 — место отбора образца пемзового туфа, ранее считавшегося связанным с кальдерой Крашенинникова (Portnyagin et al., 2020); 7 — населенные пункты; 8 — положение изученных разрезов отложений пирокластических потоков; 9 — ледники. Пунктирной линией обозначено положение увеличенного фрагмента.

**Fig. 1.** A map showing the location of sections where the pyroclastic deposits associated with the Krasheninnikov caldera were identified (a) and its enlarged fragment (b): 1 — Krasheninnikov caldera; 2–3 — position of examined sections of the caldera-forming eruptive deposits: 2 — pumice tuff, 3 — distal tephra; 4 — presumed ashfall axis; 5 — approximate position of the 1 cm isopach for the Krsh airfall; 6 — location of pumice tuff sample, previously erroneously attributed to the Krasheninnikov caldera (Portnyagin et al., 2020); 7 — villages; 8 — position of examined sections of pumice tuff; 9 — glaciers.

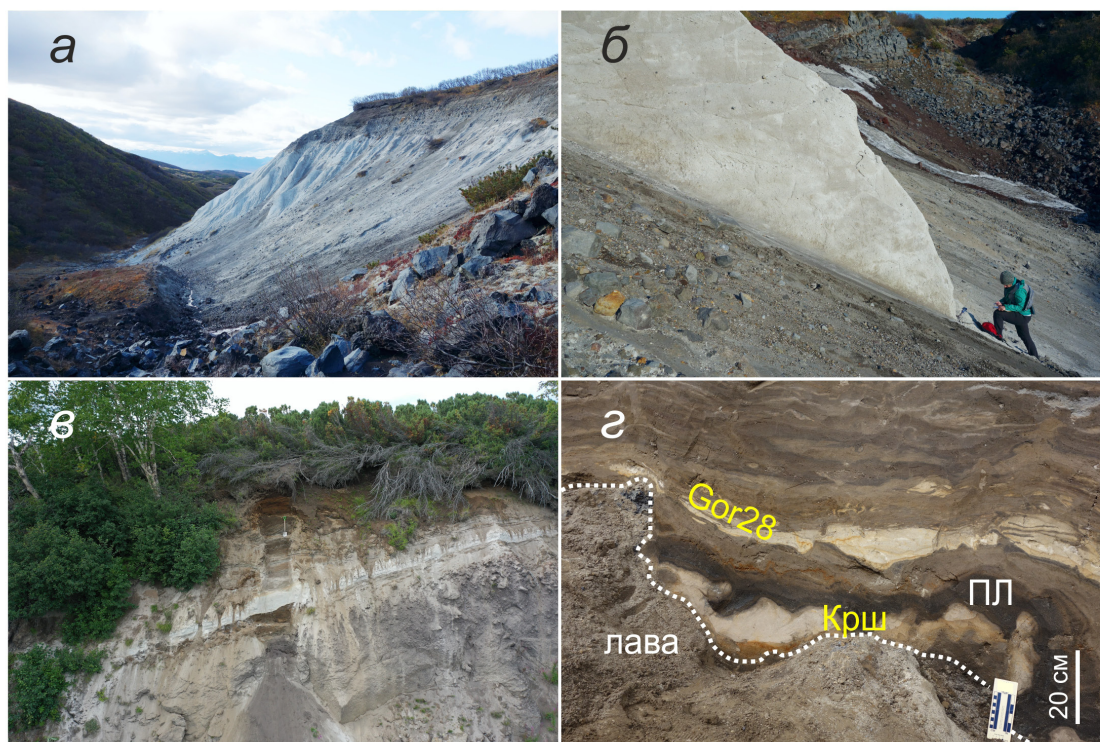
Крашенинникова, а также осуществить детальное изучение разрезов пирокластических отложений на южном берегу Кроноцкого озера (рис. 2а–в). В результате этих исследований было установлено, что именно кальдера Крашенинникова является источником тефры Geys30. Кроме того, исследования разрезов рыхлых отложений в пределах ЦКД позволили обнаружить тефру Geys30 еще в ряде разрезов от пос. Мильково до подножия Ключевского вулкана (рис. 1а). В настоящем сообщении мы приводим новые данные, позволяющие интерпретировать тефру Geys30 как продукт катастрофического извержения, приведшего к образованию кальдеры Крашенинникова, а также оценить параметры этого извержения.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Опробование пемзовых туфов было проведено у северо-западного борта кальдеры

Крашенинникова и в юго-западной части побережья Кроноцкого озера (рис. 1, 2). Видимая мощность туфов на борту кальдеры — не менее 30 м, их подошва не вскрыта. На южном берегу Кроноцкого озера (мыс Овальный) пирокластика представлена отложениями пирокластического потока мощностью 2.5–3 м, а на западном берегу (мыс Западный) — отдельными пемзовыми бомбами. Характер залегания пирокластики говорит о ее отложении в водной среде. Изученная пирокластика перекрывает игнимбриты кальдеры Узон (Флоренский, 1984). Удаленная тефра этого извержения, в дополнение к ранее описанным точкам на р. Китильгиной и в пос. Ключи, описана нами в разрезах на р. Кирганик и на подножии Ключевского вулкана (у конца лавового потока конусов Киргурич и Биокось извержения 1932 г.).

Геохимические характеристики пирокластики получены были путем определения элементного состава вулканического стекла.



**Рис. 2.** Пирокластические отложения, связанные с кальдерой Крашенинникова. Пирокластические потоки у северо-западного борта кальдеры (*а, б*) и в западной части южного берега Кроноцкого озера (мыс Овальный) (*в*), где в нижней части разреза обнажаются темно-серые игнимбриты кальдеры Узон. Разрез отложений в пос. Ключи (*г*). Gor28 — горизонт тефры вулканического центра Горелый; ПЛ — шлаки, связанные с извержениями по региональной трещинной зоне, наложенной на массив сопки Плоских; Крш — тефра кальдеры Крашенинникова (прежний индекс Geys30).

**Fig. 2.** Pyroclastic deposits associated with the Krasheninnikov caldera. *a–в* — pyroclastic flow deposits near the northwestern caldera rim (*a–б*) and in the western part of the southern shore of Kronotsky Lake (Cape Ovalny) (*в*) where dark gray ignimbrites of the Uzon caldera are exposed in the lower part of the section. Sediment section in the Klyuchi village (*г*). Gor28 — tephra layer from the Gorely volcanic center; PL — cinder from the regional fissure zone superimposed on the Plosky volcanic massif); Krsh — Krasheninnikov caldera tephra (former label Geys30).

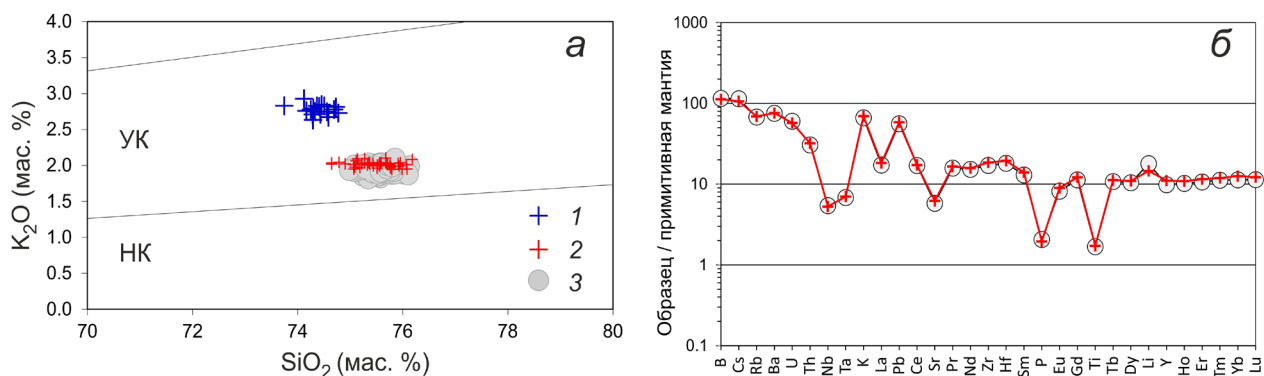
Главные элементы, а также F, S и Cl были проанализированы с помощью микрозонда JEOL JXA 8200 в Центре исследования океана им. Гельмгольца GEOMAR (г. Киль). Анализ проводился расфокусированным до 5 микрон электронным пучком. Определение содержания 40 главных и примесных элементов было проведено в Университете им. Кристиана Альбрехта (г. Киль) с использованием модифицированной системы лазерной абляции GeoLas Pro HD 193nm, интегрированной с микроскопом Олимпус, и квадрупольного масс-спектрометра индуктивно-связанной плазмы Agilent 8900. Частицы стекла анализировались в режиме статической абляции лазерным пучком диаметром 24 микрона. Аналитические условия и процедуры обработки данных подробно описаны в работе (Portnyagin et al. 2020).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Данные аналитических исследований показывают, что составы вулканического стекла из проксимальной пирокластике кальдеры

Крашенинникова и из удаленной тефры Geys30 идентичны и отвечают умеренно-калиевым риолитам с содержанием  $K_2O \sim 2$  мас. %, располагаясь на диаграмме  $SiO_2-K_2O$  (рис. 3) вблизи границы полей умеренно- и низко-калиевых пород. Такое содержание  $K_2O$  и низкие значения отношений Nb/Y (0.079) и La/Y (0.256) свидетельствуют о положении вулкана-источника в пределах фронтальной части вулканического пояса (Portnyagin et al., 2020). Указанные составы стекол отличаются от состава стекла в пемзе, которая была отобрана В.Л. Леоновым (<http://www.kscnet.ru/ivs/memory/leonov/>) между кальдерами Крашенинникова и Узон и ранее считалась продуктом кальдеры Крашенинникова (Portnyagin et al., 2020).

Таким образом, тефра Geys30, по-видимому, связана с кальдерообразующим извержением, приведшим к формированию кальдеры Крашенинникова, в связи с чем мы предлагаем использовать для нее индекс Крш (Krsh). Возраст этой тефры был ранее оценен в  $\sim 30$  тысяч лет (Ponomareva et al., 2021) и эта датировка позволяет



**Рис. 3.** Химический состав стекол из пемз, отобранных между кальдерами Крашенинникова и Узон (1), из пироклаستيку, опробованной вблизи кальдеры Крашенинникова (2) и из тефры Крш из удаленных от кальдеры Крашенинникова разрезов (3). *a* — диаграмма SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O; *b* — содержания микроэлементов (г/т) в продуктах кальдерообразующего извержения, нормализованные к составу примитивной мантии по (McDonough, Sun, 1995). Границы низкокалийевых (НК) и умереннокалийевых (УК) пород — по (Igneous..., 2002).

**Fig. 3.** Chemical composition of glasses from pumices sampled between Krashenninnikov and Uzon calderas (1), from pumice tuff sampled near the Krashenninnikov caldera (2), and from Krsh tephra from distal sections (3). *a* — SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O diagram; *b* — trace element contents (ppm) in the products of the caldera-forming eruption normalized to the composition of primitive mantle according to (McDonough, Sun, 1995). Boundaries of low-potassium (LK) and medium-potassium (MK) rocks according to (Igneous... 2002).

теперь оценить время извержения, приведшего к образованию кальдеры Крашенинникова. Судя по распределению мощностей тефры, позволяющих грубо оценить положение изопахиты 1 см, ось пеплопада была направлена на север (рис. 1). На расстоянии ~200 км от кальдеры, в районе пос. Ключи, мощность тефры достигает 12 см. Тефра Крш является важным маркером для северной части Ключевской группы вулканов, поскольку в районе пос. Ключи позволяет датировать массовые излияния лав в региональной трещинной зоне, наложенной на массив Плоских сопков (Флеров и др., 2017; Пономарева et al., 2021).

Проведенные расчеты объема извержения по методике Legros (2000) позволяют оценить минимальный объем тефры Крш в 9 км<sup>3</sup>. С учетом объема материала пирокластических потоков (~4 км<sup>3</sup>), общий объем пирокластики кальдерообразующего извержения составляет как минимум 13 км<sup>3</sup>, а магнитуа извержения (десятичный логарифм массы изверженного материала (в кг) минус семь (Pyle, 1995)) — как минимум 6.1. Такие оценки ставят данное извержение в ряд таких крупнейших вулканических событий на Камчатке как голоценовые кальдерообразующие извержения KS<sub>1</sub> и KS<sub>2</sub> в массиве Ксудач (Braitseva et al., 1995).

Ранее возраст кальдеры Крашенинникова оценивался примерно в 35–38 тыс. лет (Braitseva et al., 1995). Такая оценка была сделана на основании единственной радиоуглеродной даты 39600±1000 лет, полученной на южном берегу Кроноцкого озера под игнимбридами кальдеры Узон (рис. 2*в*), т.е. существенно ниже по разрезу (Флоренский, 1984). Наши новые данные позволяют оценить возраст кальдеры Крашенинникова в 30 тысяч лет.

Пемзовые туфы, распространенные к юго-западу от кальдеры Крашенинникова и ближе к кальдере Узон-Гейзерная, которые ранее предположительно связывались с кальдерой Крашенинникова, по-видимому, относятся к продуктам извержений в пределах кальдеры Узон-Гейзерная. Реконструкция этих извержений требует дальнейших исследований.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные новые данные позволили установить, что катастрофическое извержение с образованием кальдеры Крашенинникова произошло около 30 тысяч лет назад. Тефра этого извержения имеет региональное распространение и прослеживается в северном направлении от кальдеры на расстояние более 200 км. Объем пирокластики и магнитуа кальдерообразующего извержения оценены в ~13 км<sup>3</sup> и 6.1, соответственно.

Исследования позднеплейстоценовых отложений ЦКД выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ No 21-77-10102, <https://rscf.ru/en/project/21-77-10102/>, исследования плейстоценовых пирокластических отложений в районе Кроноцкого озера выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ No 22-17-00074, <https://rscf.ru/en/project/22-17-00074/>. Авторы искренне признательны инспекторам Кроноцкого заповедника Руслану Талгатовичу и Наталии Сергеевне Акбировой за неоценимую помощь при проведении опробования на береговых обрывах Кроноцкого озера, а также анонимным рецензентам, чьи замечания позволили улучшить текст настоящего сообщения.

## Список литературы [References]

- Флеров Г.Б., Чурикова Т.Г., Ананьев В.В. Вулканический массив Плоских Сопок: геология, петрохимия, минералогия и петрогенезис пород (Ключевская группа вулканов, Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2017. № 4. С. 30–47. <https://doi.org/10.7868/S0203030617040022> [Flerov G.B., Churikova T.G., Anan'ev V.V. The PloskieSopki volcanic massif: Geology, petrochemistry, mineralogy, and petrogenesis (Klyuchevskoi Volcanic Cluster, Kamchatka) // Journal of Volcanology and Seismology. 2017. V. 11. P. 266–284. <https://doi.org/10.1134/S0742046317040030>].
- Флоренский И.В. К вопросу о возрасте кальдер Узон и Крашенинникова // Вулканология и сейсмология. 1984. № 1. С. 102–105 [Florensky I.V. K voprosu o vozraste kalder Uzon i Krasheninnikova // Vulkanologiya and seismologiya. 1984. № 1. P. 102–105 (in Russian)].
- Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V. et al. Ages of calderas, large explosive craters and active volcanoes in the Kuril-Kamchatka region, Russia // Bulletin of Volcanology. 1995. V. 57. Iss. 6. P. 383–402. <https://doi.org/10.1007/BF00300984>.
- Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms / Ed.by Le Maitre R.W. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002. 236 p.
- Legros F. Minimum volume of a tephra fallout deposit estimated from a single isopach // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2000. V. 96. Iss. 1–2. P. 25–32. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(99\)00135-3](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(99)00135-3).
- McDonough W. F., Sun S.-S. The composition of the Earth // Chemical Geology. 1995. V. 120. № 3–4. P. 223–253. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)00140-4](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)00140-4).
- Ponomareva V., Pendea I.F., Zelenin E. et al. The first continuous late Pleistocene tephra record from Kamchatka Peninsula (NW Pacific) and its volcanological and paleogeographic implications // Quaternary Science Reviews. 2021. V. 257. Article No. 106838. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.106838>.
- Portnyagin M.V., Ponomareva V.V., Zelenin E.A. et al. TephraKam: geochemical database of glass compositions in tephra and welded tuffs from the Kamchatka volcanic arc (northwestern Pacific) // Earth System Science Data. 2020. V. 12. Iss. 1. P. 469–486. <https://doi.org/10.5194/essd-12-469-2020>.
- Pyle D.M. Assessment of the minimum volume of tephra fall deposits // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1995. V. 69. Iss. 3–4. P. 379–382. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(95\)00038-0](https://doi.org/10.1016/0377-0273(95)00038-0).
- Volynets O.N. Geochemical types, petrology, and genesis of Late Cenozoic volcanic rocks from the Kurile-Kamchatka island-arc system // International Geology Review. 1994. V. 36. № 4. P. 373–405. <https://doi.org/10.1080/00206819409465467>.

## KRASHENINNIKOV CALDERA (EASTERN KAMCHATKA): AGE AND MAGNITUDE OF ERUPTION

V.V. Ponomareva<sup>1</sup>, N.V. Gorbach<sup>1</sup>, E.A. Zelenin<sup>2</sup>, M.V. Portnyagin<sup>3</sup>,  
A.N. Rogozin<sup>1</sup>, O.V. Dirksen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006

<sup>2</sup>Geological Institute RAS, Moscow, Russia, 119017; e-mail: egorzelenin@mail.ru

<sup>3</sup>GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, Kiel, Germany, 24148

Received April 22, 2024; revised May 09, 2024; accepted September 25, 2024

New data on the composition of the pyroclastic deposits of the Krasheninnikov caldera allowed us to correlate it to the previously studied tephra horizon Geys30, which until recently was erroneously attributed to an eruption within the Geysernaya caldera. Pyroclastic flow deposits from the eruption that led to the formation of the Krasheninnikov caldera were found on the southern shore of Kronotsky Lake, and its distal tephra was found in the sediments of the Central Kamchatka Depression (CKD) at a distance of up to 200 km from the source (from Milkovo to Kliuchi villages). The age of this tephra was previously estimated at ~30 ka, which now allows us to accept this estimate for the Krasheninnikov caldera. The identification of the tephra of the caldera-forming eruption in distal sections allows a minimum estimate of the erupted pyroclastic volume of ~13 km<sup>3</sup> and the eruption magnitude of 6.1.

*Keywords:* Kamchatka, explosive eruption, tephra, Krasheninnikov caldera.