

Статистический анализ распределения продуктов фреатического извержения в кальдере вулкана Головнина (о. Кунашир, Курильские острова)

© 2021 А. И. Казаков*, О. В. Веселов, Д. Н. Козлов

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

**E-mail: legn@inbox.ru*

Резюме. Представлены результаты обработки статистическими методами данных о мощности и размерности фрагментов тефры андезидацитового состава, изверженных в результате фреатического взрыва в кальдере вулкана Головнина около 1 тыс. л.н. Дано петрохимическое описание продуктов вулканической деятельности корового вулкана Головнина и его эволюции, основанное на геолого-геофизических данных. Взаимосвязь между мощностью тефры, размерами ее фрагментов и расстоянием до центра извержения исследована с применением полиномиальных регрессий разной степени и экспоненциального распределения. Адекватность построенных моделей исходным данным проиллюстрирована коэффициентами детерминации. Построены модели распределения тефры на основе трехмерного тренд-анализа. Впервые применена логарифмическая модель для описания распределения размера обломков тефры, оценена ее точность. Получен способ оценки потенциальной дальности разброса фрагментов тефры определенного размера. Продемонстрированы возможности математической статистики при описании распространения продуктов вулканических извержений определенного типа. Результаты исследования могут пригодиться при создании информационной базы о распространении пирокластитов Курило-Камчатской вулканической области.

Ключевые слова: кальдера Головнина, тефра, тренд-анализ, логарифмическая модель

Statistical analysis of the distribution of phreatic eruption products in the caldera of the Golovnin volcano (Kunashir Island, Kuril Islands)

Artem I. Kazakov, Oleg V. Veselov, Dmitry N. Kozlov*

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

**E-mail: legn@inbox.ru*

Abstract. The paper presents the results of statistical processing of data on the thickness and size of the tephra fragments of andesidacite composition erupted as a result of a phreatic explosion in the caldera of Golovnin volcano about 1000 years ago. A petrochemical description of the products of volcanic activity of the crustal Golovnin volcano and its evolution process is presented based on geological and geophysical data. The relationship between the thickness of the tephra, the size of its fragments, and the distance to the eruption center was studied using the polynomial regressions of varying degrees and exponential distribution. The adequacy of the constructed models to the initial data is illustrated by determination coefficients. Tephra distribution models were constructed on the basis of a three-dimensional trend analysis. For the first time, a logarithmic model was used to describe the size of tephra fragments. The accuracy of the model used was estimated. A method for estimating the potential dispersion range of tephra fragments of a certain size was obtained. The work demonstrates the potential of mathematical statistics for describing the distribution of products of volcanic eruptions of a certain type. The results of this study are suitable for creating an information database of pyroclastite distribution across the Kuril-Kamchatka volcanic region.

Keywords: Golovnin caldera, tephra, trend analysis, logarithmic model

Для цитирования: Казаков А.И., Веселов О.В., Козлов Д.Н. Статистический анализ распределения продуктов фреатического извержения в кальдере вулкана Головнина (о. Кунашир, Курильские острова). *Геосистемы переходных зон*, 2021, 5(1), с 14–26. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.014-026>

Благодарности

Авторы выражают благодарность Александру Борисовичу Белоусову за плодотворное руководство экспедиционной работой и интерпретацией материалов на начальных этапах исследования в 2005–2006 гг.

Введение

На островах Курильской островной дуги (КОД) насчитывают 31 вулкан, извергавшийся в историческое время, и 12 вулканов, проявляющих сольфатарную деятельность [Сергеев, 1976; Федорченко и др., 1989; Рыбин и др., 2017]. Трудно предсказуемые во времени проявления вулканической активности, площади покрытия пеплопадом, объемы изверженного материала и другие сопутствующие извержениям эффекты представляют постоянную потенциальную опасность для жизнедеятельности на Курильских островах, а также для воздушного и водного транспорта Дальневосточного региона. Изучение результатов извержений активных вулканов, включая определение площади разброса пирокластике и мощности ее отложений, является актуальной задачей вулканологии.

На о. Кунашир, одной из наиболее населенных территорий Курильских островов, расположены три действующих вулкана – Головнина, Менделеева, Тятя и один потенциально активный – Руруй [Федорченко и др., 1989]. Оценка площадей покрытия продуктами последних извержений вулканов Тятя и Головнина была проведена в 2005–2006 гг. [Козлов, Белоусов, 2007; Козлов и др., 2008; Белоусов и др., 2017; Kozlov, Belousov, 2006; Belousov et al., 2017]. На каждом из этих вулканов в десятках пунктов с географической привязкой были измерены толщина слоя отложений и максимальный размер образцов обломочного материала извержений.

В работе [Козлов, Белоусов, 2007] проанализированы данные о мощности отложений тефры, размерах образцов последнего сильного эксплозивного извержения в кальдере влк. Головнина, произошедшего, согласно разным оценкам, от 1000 л.н. [Разжигаета, Ганзей, 2006] до 680–710 л.н. [Фазлуллин, Батоян, 1989] у южного подножья Центрально-Восточного купола (рис. 1). В результате были постро-

For citation: Kazakov A.I., Veselov O.V., Kozlov D.N. Statistical analysis of the distribution of phreatic eruption products in the caldera of the Golovnin volcano (Kunashir Island, Kuril Islands). *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, 5(1), pp. 14–26. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.014-026>

Acknowledgements

Authors are grateful to Alexander Belousov for the fruitful leadership of the expeditionary work and the materials interpretation at the initial stages of the study in 2005–2006.

ены осредненные схемы с изолиниями мощности слоя тефры (изопахиты) и максимальных размеров пирокластических фрагментов (изоплеты) в зависимости от расстояния до центра эксплозии, сделаны выводы о районировании вулканической опасности, обусловленной проявлением подобного события.

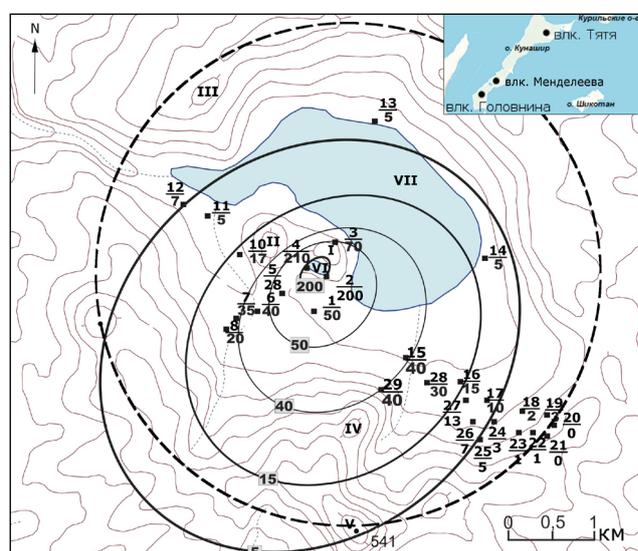


Рис. 1. Схема отложений фреатического гидротермального извержения влк. Головнина и изопахиты (см) – линии равной толщины слоя отложений извержения, по [Козлов, Белоусов, 2007]: в числителе номер измерительного пункта, в знаменателе – максимальная толщина слоя тефры. Пунктир обозначает сомму вулкана. Геоморфологические особенности кальдеры: I – купол Центрально-Восточный, II – купол Центрально-Западный, III – купол Подушечный, IV – купол Крутой, V – гора Головнина, VI – озеро Кипящее, VII – озеро Горячее. На врезке – положение вулкана на о. Кунашир.

Figure 1. Scheme of the sediments of the Golovnin volcano phreatic hydrothermal eruption and isopachs (cm) – lines of the eruption sediment layer of equal thickness according to [Kozlov, Belousov, 2007]: the numerator is the number of the measuring point, the denominator is the maximum thickness of the tephra layer. The dotted line indicates the somma. Geomorphological features of the caldera: I – Central-Eastern dome, II – Central-Western dome, III – Podushechny dome, IV – Krutoy dome, V – Golovnin mountain, VI – Kipyashchee lake, VII – Goryachee lake. The inset shows the position of the Volcano on Kunashir Island.

Авторы настоящей работы, один из которых участвовал в отборе продуктов последнего сильного извержения влк. Головнина, считают, что применение методов математической статистики [Дэвис, 1990; Геворкян и др., 2016] позволяет на основе имеющихся выборок из генеральной совокупности данных по тефре вулкана получить статистические модели, наиболее точно соответствующие закономерностям распределения тефры в изучаемом объеме. Статистическая обработка данных о распределении продуктов фреатического извержения влк. Головнина позволила построить двух- и трехмерные модели мощности слоя тефры, размеров ее фрагментов, при этом были рассмотрены варианты тренда изменения характеристик тефры в зависимости от расстояния до центра извержения.

По петрохимическому составу тефра последнего сильного извержения влк. Головнина является андезитодацитовый и риолитовой [Мархинин, 1959; Фазлуллин, Батоян, 1989], что свидетельствует о высоковязком составе верхнего магматического очага, обусловившем взрывной характер извержения, поэтому авторы посчитали необходимым представить краткое геолого-геофизическое описание строения влк. Головнина и эволюции его магматической деятельности, определившей состав продуктов последнего сильного извержения.

Описание вулкана Головнина по геолого-геофизическим данным

Кальдерный вулкан Головнина расположен на юге о. Кунашир (рис. 1). Его координаты 43°51' N, 145°30' E. Диаметр кальдеры по гребню соммы равен примерно 4.5 км, диаметр древнего основания более 10 км [Мархинин, 1959; Козлов, 2015]. Наивысшей точкой соммы является гора Головнина высотой 547 м, находящаяся в юго-восточной части кальдеры (рис. 1). В центре кальдеры в широтном направлении расположены два экструзивных купола андезитодацитового состава – Центрально-Восточный и Центрально-Западный. На северо-западе кальдеры и ее юго-востоке находятся купола Подушечный и Крутой аналогичной морфологии и петрохимии. В центре кальдеры активно проявляется сольфатарная и гидротермальная деятельность. Температура сольфатар достигает 100 °C [Мархинин, 1959; Жарков, 2014].

История формирования влк. Головнина, возникшего как подводный вулкан, делится, по мнению отечественных вулканологов [Мархинин, 1959; Федорченко, 1962; Брайцева и др., 1994; и др.], на три основных периода. Первый – образование в позднем плейстоцене вулканического конуса высотой до 1500 м с центральным кратером на вершине. Второй – возникновение, в результате сильнейшего взрыва, кальдеры с обрушением центральной части вулканической постройки. Это событие, по данным С-датировок, произошло около 38 тыс. л.н. [Брайцева и др., 1994; Мелекесцев, 2005]. В третьем периоде в кальдере активно проявляется экструзивно-эксплозивная и фумарольно-сульфатарная деятельность. Деятельность влк. Головнина на протяжении всего существования была, по мнению Г.С. Горшкова, преимущественно эксплозивной, поэтому его отложения характеризуются очень большим количеством пирокластического материала [Горшков, 1967]. На первых этапах третьего периода в кальдере возникли ранее упомянутые купола, выжатые по субвертикальным зонам разломов из магматических очагов, находящихся в земной коре. Другими характерными морфологическими элементами кальдеры Головнина стали воронкообразные образования, которые определяются как воронки взрыва, возникшие позже формирования Центральных куполов [Федорченко, 1962]. Одним из наиболее выразительных примеров таких образований является воронка фреатического взрыва, частично врезанная в южное подножье Центрально-Восточного купола. Ее диаметр около 350 м, объем 0.00245 км³ [Kozlov, Belousov, 2006]. Дно воронки занимает оз. Кипящее, диаметр которого более 200 м [Жарков, 2014; Козлов, 2015]. Глубина озера достигает 16 м, площадь его зеркала – 66 000 м² [Козлов, Жарков, 2010; Козлов, 2015]. Со дна озера поднимаются газовые струи с температурой до 90° [Жарков, 2014]. Эта воронка образовалась в результате последнего сильного проявления эксплозивной деятельности в кальдере, произошедшего, согласно разным оценкам, от 1000 л.н. [Разжигаева, Ганзей, 2006] до 680–710 л.н. [Фазлуллин, Батоян, 1989].

По результатам исследований были построены схемы изменения мощности отложений этого события в зависимости от расстояния до берега оз. Кипящее и изменения

максимального размера обломков в зависимости от мощности отложений и удаления от озера [Козлов, Белоусов, 2007]. При взрыве объем выброшенного в юго-восточном направлении материала составлял 0.00241 км^3 , что практически совпадает с объемом озерной воронки. Мощность отложений изменяется от 2.5 м по берегам оз. Кипящее до 50–60 см на удалении 0.5 км. Средний размер обломков равен 8–12 см на расстоянии 1 км от озерного берега и 3–5 см – на расстоянии 2 км в юго-юго-западном направлении. Разбросанные по берегу озера крупные блоки достигают размеров 1.5 м [Жарков, 2014]. Отдельные образцы найдены на расстоянии до 10 км (образец 91Р андезитового состава обнаружен на 15-м километре дороги Менделеево–Головнино) [Федорченко и др., 1989].

Петрохимический состав вулканогенных отложений вулкана Головнина

Описание петрохимического состава вулканогенных отложений влк. Головнина необходимо для представления об эволюции продуктов извержений. По литературным данным известно 40 определений полного силикатного анализа изверженных пород этого вулкана [Мархинин, 1959; Петрохимия... , 1966; Фролова и др., 1985; Федорченко и др., 1989; Подводный... , 1992; Мартынов А., Мартынов Ю., 2017]. На основании петрохимических характеристик эффузивных пород нами построены классификационные диаграммы (рис. 2). Аналитические данные определений основных окислов удовлетворяют современным требованиям к геохимии этих окислов¹. Исследованные образцы пород вулкана имеют в подавляющем большинстве (75 %) андезитовый и андезитодацитовый составы.

На классификационной диаграмме $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ [Le Bas et al., 1986], дополненной схемой щелочной сериальности, породы вулкана находятся в поле низкой щелочности со-

гласно нормам терминологической Петрологической комиссии РАН². Продукты извержений влк. Головнина на протяжении всех периодов его развития оставались низкокальциевыми со средним содержанием K_2O (0.45 масс.%). Согласно критерию А. Мияширо [Miyashiro, 1974], породы ранних извержений вулкана на диаграмме $\text{SiO} - \text{FeO}^*/\text{MgO}$ находятся в поле толеитов, но основная масса эффузивов (более 60 %) – в известково-щелочном поле. Тренд дифференциации эффузивов вулкана не прямолинеен. Он переходит из толеитового поля в известково-щелочное через область среднего состава, что свидетельствует о смене во времени термобарических условий магматических очагов [Рыбин, Пискунов, 1991].

На диаграммах отчетливо прослеживается эволюция магматической деятельности вулкана, при которой состав продуктов меняется от основного на первых этапах активности к более кислому на завершающих этапах. Таким образом, при эволюции эффузивной деятельности влк. Головнина от ранних извержений к более поздним происходила дифференциация состава магматического очага, при которой температура кристаллизации расплавов изменяется от высокой к более низкой при уменьшении глубины магматической камеры. Это свидетельствует о гомодромном характере эволюции вулканизма.

Для оценки температур и глубины основного магматического источника эффузивов влк. Головнина использованы представленные в работах [Печерский и др., 1975; Рассказов и др., 2007; Falloon et al., 2001; Lee, Chin, 2014; и др.] уравнения зависимости температуры и давления от содержания MgO и щелочных окислов. Согласно нашим расчетам по этим уравнениям, магматическая колонна находится в интервале глубин 40–26 км с температурами 1230–1100 °С, температурным градиентом около 9 °С/км. Основная магматическая камера, продуцирующая эффузивы, находится в интервале 35–31 км с температурами 1160–1135 °С.

¹ Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. 2009. Изд. 3-е, испр. и доп. СПб.: ВСЕГЕИ, 198 с.

Petrograficheskij kodeks Rossii. Magmaticheskie, metamorficheskie, metasomaticheskie, impaktnye obrazovaniya [The petrographic code of Russia. Magmatic, metamorphic, metasomatic, and impact rocks]. 2009. Ed. 3. [revised and expanded]. SPb.: VSEGEI, 198 p. (In Russ.).

² Классификация магматических (изверженных) пород и словарь терминов: Рекомендации Подкомиссии по систематике изверженных пород Международного союза геологических наук. 1997. М.: Недра, 248 с. (Пер. с англ.)

A classification of igneous rocks and glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the systematics of igneous rocks. Ed. by R.W. Le Maitre. 1989. Oxford: Blackwell Science Inc. URL: <https://www.amazon.com/Classification-Igneous-Rocks-Glossary-Terms/dp/063202593X> (accessed 24.11.2020).

Исходя из анализа диаграмм Харкера (рис. 2 б, г, ж, з), низкие концентрации TiO_2 , CaO , FeO^* , K_2O доказывают принадлежность эффузивов влк. Головнина к умеренно-щелочной серии островодужного геохимического типа. Широкий диапазон состава изверженных пород вулкана (от базальтов до риодацитов)

свидетельствует о длительной эволюции магматических очагов, присущей коровым вулканам, которые характеризуются серией промежуточных коровых очагов по определению В.Л. Сывороткина [1996]. Эволюция состава магмы, поступающей к поверхности, от островодужных толеитов к известково-щелочным

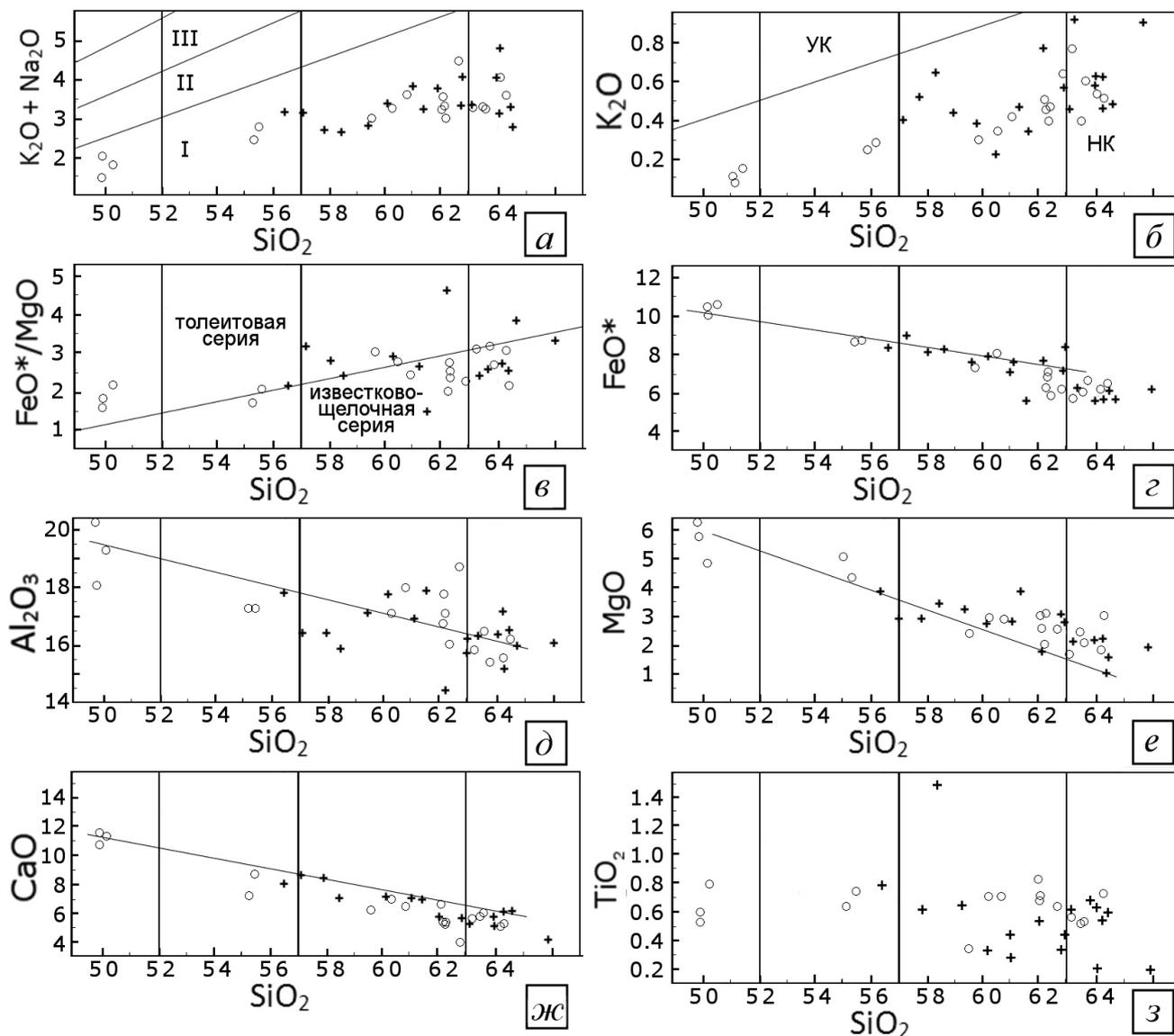


Рис. 2. Классификационные диаграммы изверженных пород влк. Головнина (о. Кунашир) (содержание в масс.%): (а) TAS-диаграмма: $SiO_2 - (Na_2O + K_2O)$ [Le Bas et al., 1986] и схема сериальности щелочей, ряды щелочности: I – низкой, II – нормальной, III – умеренной; (б) $SiO_2 - K_2O$, породы: НК – низкокалийевые, УК – умереннокалийевые; (в) $SiO_2 - FeO^*/MgO$ (согласно критерию [Miyashiro, 1974]); (г) $SiO_2 - FeO^*$; (д) $SiO_2 - Al_2O_3$; (е) $SiO_2 - MgO$; (ж) $SiO_2 - Al_2O_3$; (з) $SiO_2 - TiO_2$. Символами обозначены породы влк. Головнина по соотношению FeO/Fe_2O_3 : кружками – больше 1 (восстановительные условия формирования магмы), крестиками – меньше 1 (окислительные условия формирования магмы).

Figure 2. Classification diagrams of igneous rocks of the Golovnin volcano (Kunashir Island) (content in wt%): (a) TAS-diagram: $SiO_2 - (Na_2O + K_2O)$ [Le Bas et al., 1986] and the scheme of alkali seriality, series of alkalinity: I – low, II – normal, III – moderate; (б) $SiO_2 - K_2O$ diagram, rocks: НК – low potassium, УК – moderate potassium; (в) $SiO_2 - FeO^*/MgO$ diagram according to A. Miyashiro's criterion [Miyashiro, 1974]; (г) $SiO_2 - FeO^*$ diagram; (д) $SiO_2 - Al_2O_3$ diagram; (е) $SiO_2 - MgO$ diagram; (ж) $SiO_2 - Al_2O_3$ diagram; (з) $SiO_2 - TiO_2$ diagram. Legend of the rocks of the Golovnin volcano on the basis of FeO/Fe_2O_3 ratio: circles – more than 1 (reducing conditions of magma formation), crosses – less than 1 (oxidizing conditions of magma formation).

породам соответствует, как отмечено выше, гомодромной направленности изменения во времени состава магматических продуктов [Геохимия... , 1984; Богатилов, Цветков, 1988; и др.]. Такая эволюция магм происходит из-за возрастающей доли внутрикорового магматизма. Формирование андезитодацитового и риолитового расплава обусловлено приближением к поверхности коровых магматических очагов. Низкая титанистость продуктов заключительных извержений также является доказательством малоглубинности магматического очага [Фролова и др., 1989].

О близости к поверхности магматических камер свидетельствует высокий фоновый тепловой поток (ТП) о. Кунашир [Веселов, Соинов, 1997]. На склонах активных вулканов южной части Курильской островной дуги ТП резко возрастает. Так, на северо-восточном склоне влк. Менделеева, кальдера которого возникла почти одновременно с образованием кальдеры влк. Головнина [Брайцева и др., 1994], ТП изменяется от 400 до 900 мВт/м² и выше. Этот высокий ТП создается близко расположенными к поверхности магматическими очагами среднего и кислого составов. Под Нижне-Менделеевским участком кровля магматического очага дацитового состава находится на глубинах 3–5 км с температурой в центре очага 750–780 °С [Веселов, Соинов, 1997; Ильев и др., 2009].

Аналогичная геотермическая ситуация присуща влк. Головнина, кальдера которого характеризуется активными сольфатарными и гидротермальными проявлениями. По сейсмическим данным, полученным Т.К. Злобинным методом обменных волн землетрясений, под влк. Головнина выделяются как глубинная зона затухания сейсмических волн в интервале 20–40 км, так и приповерхностная зона отсутствия обменов сейсмических волн в интервале 5–10 км [Злобин, Федорченко, 1982; Злобин, 1987]. В районе оз. Кипящее устанавливается подъем области отсутствия обменов сейсмических волн до глубины 3 км [Злобин, 1987]. При медленном продвижении магмы к земной поверхности состав титаномагнетитов в габброидах будет соответствовать последнему равновесному состоянию температуры и давления кислорода в расплаве до начала его кристаллизации [Печерский и др., 1975]. Как свидетельствуют результаты исследований [Печерский и др., 1975; Ермаков,

Печерский, 1989], включения габброидов, прошедшие высокотемпературную переработку в среде пород земной коры на глубинах 5–20 км в высокоокислительных условиях с участием мантийных флюидов, становятся вторично магнитными и отношение TiO_2/FeO в этих породах находится в пределах 0.02–0.06. Четверть образцов из 40 определений полного силикатного состава, использованных нами по литературным данным для построения классификационных диаграмм (рис. 2), характеризуется этими показателями, что свидетельствует о существовании магматических очагов под влк. Головнина в пределах верхней части земной коры. Периферический очаг под оз. Кипящее является источником продуктов последнего сильного извержения андезитодацитового и риолитового состава. Аналогичное по петрохимическому составу эффузивов извержение, по нашему мнению, вероятно для влк. Менделеева. В связи с этим статистические методы анализа распространения тефры влк. Головнина могут служить для характеристики продуктов подобных извержений других действующих вулканов КОД, таких как вулканы Менделеева, Заварицкого и др.

В данной работе изучены статистическими методами [Дэвис, 1990; Геворкян и др., 2016] особенности выпадения продуктов последнего сильного эксплозивного извержения в кальдере влк. Головнина.

Методы и результаты исследования изверженного материала

Для создания карты распространения продуктов взрывного извержения в кальдере влк. Головнина Д.Н. Козловым и А.Б. Белоусовым в 2006 г. были проведены измерения мощности слоя тефры в 28 пунктах и максимальных размеров пирокластических фрагментов тефры в 22 пунктах. Систематизация данных, их обработка позволили составить карты изопакит и изоплет продуктов взрыва (рис. 3) [Kozlov, Belousov, 2006]. Данные о мощности слоя и размере обломков приведены в таблице.

При оценке взаимосвязи между мощностью слоя тефры и максимальными размерами ее фрагментов на основе результатов [Козлов, Белоусов, 2007] нами были применены линейная и полиномиальные модели регрессии 2–6 степеней, а также экспоненциальная кривая. С помощью полученной зависимости проведена аппроксимация мощности слоя тефры в

пунктах, где была измерена только величина ее фрагментов, а также обратная аппроксимация.

Для построения моделей разброса тefры применялся трехмерный тренд-анализ, в качестве аналитически заданной поверхности предложена логарифмическая функция. На основе этой трехмерной модели получен способ оценки потенциальной дальности перемещения фрагментов тefры определенного размера.

В целях зонирования продуктов извержения изопахиты и изоплеты заданы уравнениями в полярных координатах.

Для выявления зависимости между мощностью слоя тefры и максимальным размером ее фрагментов построены двухмерные модели регрессии методом наименьших квадратов по тем пунктам, в которых измерены обе величины. Таким образом получен линейный тренд

$m = 4.438d + 3.051$, где m и d – мощность слоя и размер фрагментов тefры в сантиметрах соответственно (рис. 4). Коэффициент детерминации составил 89 %. Этот показатель позволяет использовать полученный линейный тренд для аппроксимации мощности слоя тefры в пунктах, где была измерена только величина ее фрагментов, а также для обратной аппроксимации.

Помимо линейной регрессии для описания связи между мощностью слоя и размером фрагментов тefры нами были применены уравнения полиномиальной регрессии степеней от 2 до 6, а также экспоненциальная функция. Коэффициент детерминации для полиномиальных кривых составил 89–93 %, а для экспоненты – 80 %. Различие в точности приближения не более 4 % между линейной

Таблица. Данные о мощности слоя m и величине фрагментов d продуктов фреатического извержения влк. Головнина

Table. Data on the thickness of the layer m and the size of fragments d for products of the Golovnin volcano phreatic eruption

Параметр	Номер точки отбора														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
m , см	50	200	70	210	28	40	35	20	–	17	5	7	5	5	40
d , см	10.3	–	6.4	–	4	8.8	6	7.4	1.5	3.5	0.5	0.7	0.7	0.7	7.5
	Номер точки отбора														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
m , см	15	10	2	3	0	0	1	1	3	5	7	13	30	40	
d , см	3.4	1	0.5	–	–	–	–	–	0.5	0.5	1.6	1	6	6.6	

Примечание. Прочерк – отсутствие данных.

Note. Dash – no data available.

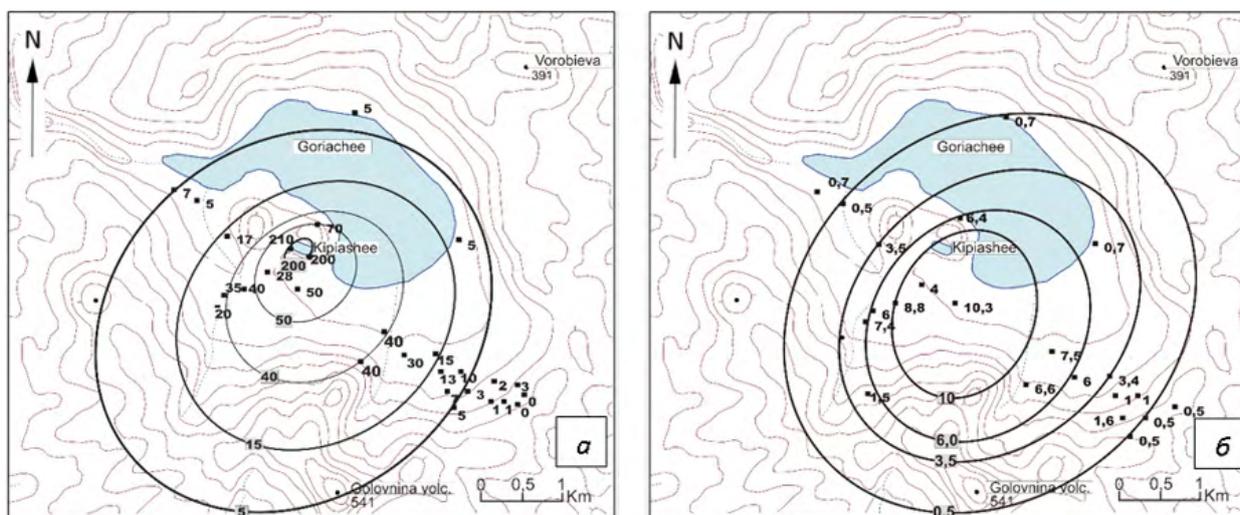


Рис. 3. Карта распространения продуктов фреатического извержения влк. Головнина: (а) линии равной толщины слоя отложений – изопахиты (см); (б) линии равного размера тefры – изоплеты (см) [Козлов, Белоусов, 2007].

Figure 3. Products distribution map of the Golovnin volcano phreatic eruption: (a) lines of the sediment layer of equal thickness – isopachs (cm); (б) lines of tephra of equal size – isopleths (cm) [Kozlov, Belousov, 2007].

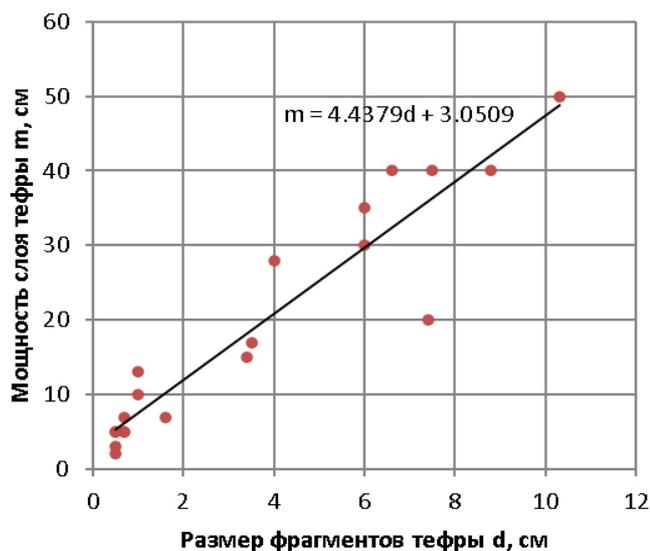


Рис. 4. Линейная регрессия мощности слоя тefры фреатического извержения влк. Головнина на размер ее фрагментов.

Figure 4. Linear regression of the tephra layer thickness of the Golovnin volcano phreatic eruption on the size of its fragments.

моделью и нелинейными представляется нам незначительным по сравнению с возрастающей сложностью вычислений. Кроме того, мощность слоя тefры и величина ее фрагментов выражены в одних и тех же единицах измерения и формирование мощности слоя происходит путем сложения величин фрагментов тefры или их частей. Таким образом, как физически, так и математически для выявления закономерности между величиной фрагментов тefры фреатического извержения влк. Головнина и мощностью ее слоя оптимальной является линейная регрессионная модель.

Для построения моделей разброса тefры применялся трехмерный тренд-анализ. Логарифмическая модель для описания распределения мощности слоя тefры приняла следующий вид: $\bar{m} = 48.838 - 52.327 \ln \sqrt{x^2 + y^2}$ (рис. 5).

Для статистической оценки построенной трехмерной модели распространения изверженных продуктов применен дисперсионный анализ, коэффициент множественной корреляции составил 80 %.

Получены также упрощенные двумерные аналитические модели разброса тefры. С этой целью эллиптические изопакиты и изоплеты, построенные в работе [Козлов, Белоусов, 2007] (рис. 3), аппроксимированы уравнениями в полярных координатах. В частности, для изопакит имеем следующие зависимости (ρ – полярный радиус, φ – полярный угол):

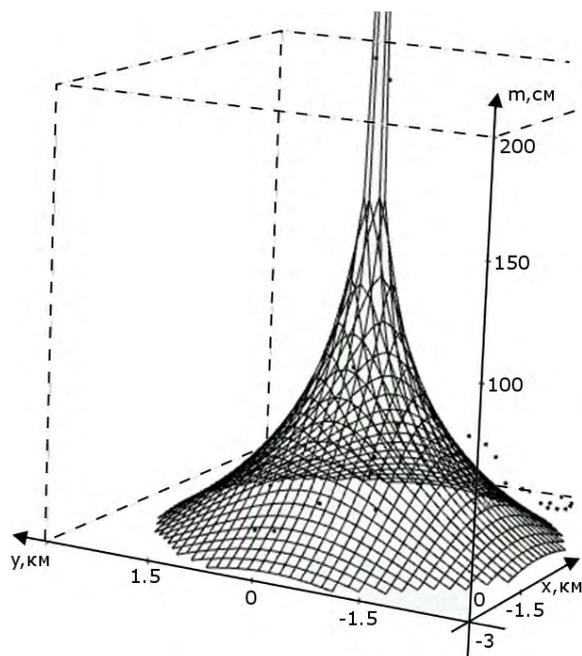


Рис. 5. Логарифмическая модель мощности слоя тefры фреатического извержения влк. Головнина. Горизонтальные оси – широтное и меридиональное направления в пространстве (км), вертикальная – мощность отложений фреатического извержения (см). Начало отсчета в координатах (x; y) приурочено к центру оз. Кипящее.

Figure 5. Logarithmic model of the tephra layer thickness of the Golovnin volcano phreatic eruption. Horizontal axes – latitudinal and meridional directions in space (km), vertical axis – thickness of phreatic eruption sediments (cm). The reference point in the coordinates (x; y) is confined to the center of the Kipyashchee lake.

$$200 \text{ см: } \rho = \frac{0.01}{1 - 0.759 \cos \varphi} \quad (43^\circ 52' 15'' \text{ N}, 145^\circ 31' 02'' \text{ E}),$$

$$50 \text{ см: } \rho = \frac{0.04}{1 - 0.507 \cos \varphi} \quad (43^\circ 51' 57'' \text{ N}, 145^\circ 30' 32'' \text{ E}),$$

$$40 \text{ см: } \rho = \frac{0.07}{1 - 0.554 \cos \varphi} \quad (43^\circ 51' 57'' \text{ N}, 145^\circ 30' 32'' \text{ E}),$$

$$15 \text{ см: } \rho = \frac{0.11}{1 - 0.524 \cos \varphi} \quad (43^\circ 52' 00'' \text{ N}, 145^\circ 30' 10'' \text{ E}),$$

$$5 \text{ см: } \rho = \frac{0.15}{1 - 0.549 \cos \varphi} \quad (43^\circ 51' 57'' \text{ N}, 145^\circ 30' 01'' \text{ E}).$$

Для построения каждого из пяти уравнений за полюс принят фокус изопакиты, находящийся ближе к оз. Кипящее (его координаты для каждой зависимости указаны в скобках), за полярную ось – направление максимального разноса обломочного материала (азимут 225°).

При статистическом анализе были также рассмотрены варианты поверхности тренда для размера фрагментов тefры (плоскости, поверхности второго порядка и др.). Среди них наиболее качественным приближением (коэффициент множественной корреляции

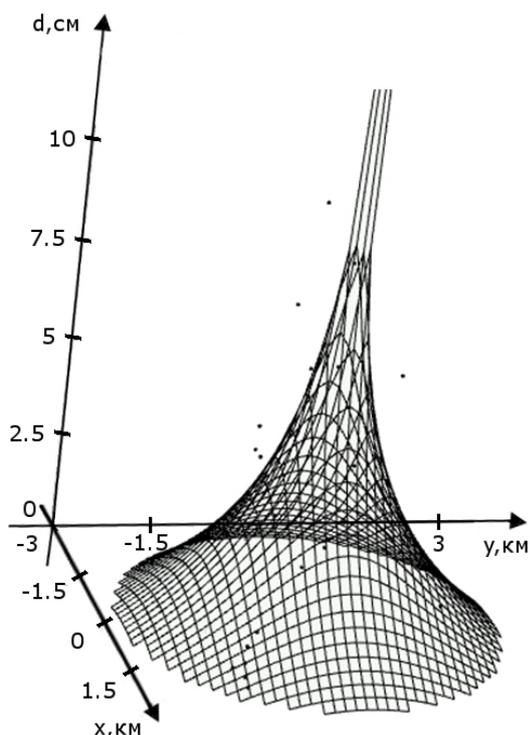


Рис. 6. Логарифмическая модель для размера фрагментов тефры фреатического извержения влк. Головнина. Горизонтальные оси – широтное и меридиональное направления в пространстве, вертикальная – размер фрагментов тефры.

Figure 6. Logarithmic model for the size of tephra fragments of the Golovnin volcano phreatic eruption. Horizontal axes – latitudinal and meridional directions in space, vertical axis – the size of tephra fragments.

72 %) является также логарифмический тренд: $\bar{d} = 3.104 - 1.618 \ln \sqrt{x^2 + y^2}$ (рис. 6). С помощью этой модели можно оценить потенциальную дальность перемещения r в результате извержения фрагмента тефры в зависимости от его размера d . Каждому размеру d соответствует окружность разброса с радиусом $\exp(3.8368 - 1.2361d)$.

В результате проведенных нами исследований вычислен коэффициент корреляции между мощностью слоя тефры последнего сильного извержения влк. Головнина и величиной ее обломков, составивший 95 %. Это позволило построить модели распределения по площади продуктов извержения с хорошей точностью (коэффициент детерминации 70–90 %).

Методы математической статистики, примененные в настоящей работе для анализа распределения мощности слоя тефры, построения зависимостей между мощностью слоя тефры и максимальным размером ее фрагментов, могут быть использованы при исследовании других коровых вулканов.

Выводы

Мощность слоя тефры последнего сильного извержения влк. Головнина имеет тесную линейную связь с размером фрагментов тефры этого извержения (коэффициент корреляции составил 95 %). Исследование показало, что по сравнению с экспоненциальной и полиномиальными моделями степеней от 2 до 6 оптимальной для выявления закономерности между величиной фрагментов тефры фреатического извержения влк. Головнина и мощностью ее слоя является линейная регрессионная модель. Из различных вариантов поверхностей тренда для размера фрагментов тефры наиболее качественным приближением является логарифмический тренд (коэффициент множественной корреляции 72 %).

Проведенный статистический анализ распределения андезитодацитов тефры фреатического извержения в кальдере влк. Головнина позволил построить математические модели хорошей точности (70–93 % соответствия исходным данным). Используемые в настоящем исследовании статистические методы впервые применены к анализу продуктов извержения влк. Головнина. Эти результаты, как показано на примере расчета дальности разброса обломков в зависимости от их размера, несомненно полезны при оценке вулканопасности района.

Продемонстрированные в работе возможности математической статистики в области описания распространения продуктов извержений могут быть использованы при формировании сводной информационной базы о характеристиках известных извержений коровых вулканов, разумеется, в тех случаях, когда предлагаемые подходы применимы. Согласно полученным результатам, для извержений фреатического типа модели линейной регрессии адекватно описывают взаимосвязь между мощностью слоя тефры и размером ее обломков. При построении моделей с привязкой к пространственному фактору важную роль играет интенсивность извержения, объем выброшенных продуктов.

Оценки статистическими методами распространения продуктов извержения активного вулкана демонстрируют их применимость для анализа особенностей распространения пирокластиков активных вулканов Курильской островной дуги.

Список литературы

1. Белоусов А.Б., Белоусова М.Г., Козлов Д.Н. **2017**. Распространение отложений тефры и реконструкция параметров эксплозивного извержения вулкана Тятя 1973 г., о. Кунашир, Курильские острова. *Вулканология и сейсмология*, 4: 48–56. URL: <http://repo.kscnet.ru/id/eprint/3270> (дата обращения: 16.02.2021).
2. Богатиков О.А., Цветков А.А. **1988**. *Магматическая эволюция островных дуг*. М.: Наука, 248 с.
3. Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д., Литаева С.И. **1994**. Возраст действующих вулканов Курило-Камчатского региона. *Вулканология и сейсмология*, 4–5: 5–32.
4. Веселов О.В., Соинов В.В. **1997**. Тепловой поток Сахалина и южных Курильских островов. В кн.: *Структура и вещественный состав осадочного чехла северо-запада Тихого океана*. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 153–176. (Геодинамика тектоносферы зоны сочленения Тихого океана с Евразией; т. 4).
5. Геворкян П.С., Потёмкин А.В., Эйсымонт И.М. **2016**. *Теория вероятностей и математическая статистика*. М.: Физматлит, 176 с.
6. *Геохимия магматических пород океана и зон сочленения океан — континент* (отв. ред. Л.В. Таусон). **1984**. Новосибирск: Наука, 185 с.
7. Горшков Г.С. **1967**. *Вулканизм Курильской островной дуги*. М.: Наука, 287 с.
8. Дэвис Дж.С. **1990**. *Статистический анализ данных в геологии*: пер. с англ. Кн. 2. М.: Недра, 429 с. URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-0603397941a9dzhstatischeskiyanalizdannihvgeologikniga2-1.pdf> (дата обращения: 12.01.2021).
9. Ермаков В.А., Печерский Д.М. **1989**. Природа включений габброидов из молодых лав Курильских островов. *Тихоокеанская геология*, 4: 45–55.
10. Жарков Р.В. **2014**. *Термальные источники Южных Курильских островов*. Владивосток: Дальнаука, 378 с.
11. Злобин Т.К. **1987**. *Строение земной коры и верхней мантии Курильской островной дуги* (по сейсмическим данным). Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 150 с.
12. Злобин Т.К., Федорченко В.И. **1982**. Глубинная структура вулкана Головнина по данным изучения обменных волн от землетрясений. *Вулканология и сейсмология*, 4: 99–103.
13. Ильёв А.Я., Кононов В.Э., Веселов О.В., Красиков В.Н., Волгин П.Ф., Кочергин Е.В., Кочергин А.В., Сеначин В.Н., Шереметьева Г.Н., Лютая Л.М. **2009**. *Геолого-геофизическая характеристика и перспективы нефтегазоносности Срединно-Курильского прогиба*. Владивосток: Дальнаука, 141 с.
14. Козлов Д.Н. **2015**. *Кратерные озера Курильских островов*. Южно-Сахалинск: Сахалинский областной краеведческий музей; ИМГиГ ДВО РАН, 112 с.
15. Козлов Д.Н., Белоусов А.Б. **2007**. Характеристики отложений тефры последнего фреатического извержения в кальдере Головнина (Кунашир, Курильские острова) – ключ к оценке опасности будущих извержений. В кн.: *Изучение природных катастроф на Сахалине и Курильских островах: сб. мат-лов I (XIX) Междунар. конф. молодых ученых, г. Южно-Сахалинск, 15–20 июня 2006 г.* Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 164–166.
16. Козлов Д.Н., Жарков Р.В. **2010**. Морфология и генезис озер кальдерных комплексов Головнина и Заварицкого (Курильские острова). *Вестник ДВО РАН*, 3: 103–106.
17. Козлов Д.Н., Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. **2008**. Распространение тефры извержения вулкана Тятя 1973 г. (о. Кунашир, Курильские острова). В кн.: *Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз: вторая Сахалинская молодеж. научная школа, 4–10 июня 2007, Южно-Сахалинск*: сб. материалов. Южно-Сахалинск, 264–267.
18. Мартынов А.Ю., Мартынов Ю.А. **2017**. Плейстоценовый базальтовый вулканизм о. Кунашир (Курильская островная дуга): минералогия, геохимия, результаты компьютерного моделирования. *Петрология*, 25 (2): 194–214. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_28919451_78315408.pdf (дата обращения: 12.01.2021).
19. Мархинин Е.К. **1959**. Вулканы острова Кунашир. В кн.: *Вулканизм Камчатки и Курильских островов*. М.: Изд-во АН СССР, 64–155.
20. Мелекесцев И.В. **2005**. Новейший ($N_2^2 - Q_4$) наземный и подводный вулканизм Курильской островной дуги. В кн.: *Новейший и современный вулканизм на территории России* (отв. ред. Н.П. Лаверов). М.: Наука, 233–335.
21. *Петрохимия кайнозойской Курило-Камчатской вулканической провинции* (под ред. Э.Н. Эрлиха). **1966**. М.: Наука, 278 с.
22. Печерский Д.М., Багин В.И., Бродская С.Ю., Шаронова З.В. **1975**. *Магнетизм и условия образования изверженных горных пород*. М.: Наука, 288 с.
23. *Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги* (отв. ред. Ю.М. Пущаровский). **1992**. М.: Наука, 527 с.
24. Разжигасева Н.Г., Ганзей Л.А. **2006**. *Обстановки осадконакопления островных территорий в плейстоцен-голоцене*. Владивосток: Дальнаука, 247 с.

25. Рассказов С.В., Демонтьерова Е.И., Иванов А.В., Брандт И.С., Брандт С.В. **2007**. Эволюция позд-некайнозойского магматизма на границе Тувино-Монгольского массива (Восточная Тува). Иркутск: ИЗК СО РАН, 161 с.
26. Рыбин А.В., Пискунов Б.Н. **1991**. О петрохимическом родстве составов интрузивных и эффузивных пород Курильских островов (на примере острова Кунашир). В кн.: *Геология, металлогения и гидрогеология Сахалина и Курильских островов*. Владивосток: ДВО РАН, 82–90.
27. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Дегтерев А.В., Гурьянов В.Б. **2017**. Вулканическая активность на Курильских островах в XXI в. *Вестник ДВО РАН*, 1: 51–61.
28. Сергеев К.Ф. **1976**. *Тектоника Курильской островной системы*. М.: Наука, 240 с.
29. Сывороткин В.Л. **1996**. *Коровые вулканы Курило-Камчатской островной дуги*. М.: Геоинформмарк, 52 с.
30. Фазлуллин С.М., Батоян В.В. **1989**. Донные осадки кратерного озера вулкана Головнина. *Вулканология и сейсмология*, 2: 44–55.
31. Федорченко В.И. **1962**. Основные этапы посткальдерного периода формирования вулкана Головнина (о. Кунашир). В кн.: *Геология и геофизика*. Южно-Сахалинск, 127–142. (Труды СахКНИИ; вып. 12).
32. Федорченко В.И., Абдурахманов А.И., Родионова Р.И. **1989**. *Вулканизм Курильской островной дуги: геология и петрогенезис*. М.: Наука, 239 с.
33. Фролова Т.И., Бурикова И.А., Гушин А.В., Фролов В.Т., Сывороткин В.Л. **1985**. *Происхождение вулканических серий островных дуг*. М.: Недра, 275 с.
34. Фролова Т.И., Перчук Л.Л., Бурикова И.А. **1989**. *Магматизм и преобразование земной коры активных окраин*. М.: Недра, 261 с.
35. Belousov A., Belousova M., Kozlov D. **2017**. Strong hydrothermal eruption 600 BP inside Golovnin caldera, Kunashir Island, Kurile arc. In: *19th EGU General Assembly, EGU 2017: Proceedings from the conference held 23–28 April, 2017 in Vienna, Austria*, p. 7596.
36. Falloon T.J., Danyushevsky L.V., Green D.H. **2001**. Peridotite melting at 1 GPa: Reversal experiments on partial melt compositions produced by peridotite-basalt sandwich experiments. *J. Petrology*, 42 (12): 2363–2390. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.12.2363>
37. Kozlov D., Belousov A. **2006**. Hydrothermal eruption – the most probable scenario of volcanic disaster in the Golovnin Caldera, Kunashir Island, Southern Kuriles. In: *5th Biennial Workshop on Subduction Processes emphasizing the Japan-Kuril-Kamchatka-Aleutian Arcs (JKASP-5) and International Volcanological Field School for Graduate Students Japan, 9–14 July 2006, Sapporo, Japan*. Sapporo: Hokkaido Univ. Int., p. 140–141.
38. Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B. **1986**. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J. of Petrology*, 27(3): 745–750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>
39. Lee C.-T.A., Chin E.J. **2014**. Calculating melting temperatures and pressures of peridotite protoliths: implication for the origin of cratonic mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 403: 273–286. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.06.048>
40. Miyashiro A. **1974**. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American J. of Science*, 274(4): 321–355. <https://doi.org/10.2475/ajs.274.4.321>

References

1. Belousov A.B., Belousova M.G., Kozlov D.N. **2017**. The distribution of tephra deposits and reconstructing the parameters of 1973 eruption on Tyatya volcano, Kunashir I., Kuril Islands. *J. of Volcanology and Seismology*, 11(4): 285–294. <https://doi.org/10.1134/s0742046317040029>
2. Bogatkov O.A., Tsvetkov A.A. **1988**. *Magmaticheskaya evolyutsiya ostrovnykh dug [Magmatic evolution of island arcs]*. Moscow: Nauka, 248 p. (In Russ.).
3. Braytseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., Sulerzhitskiy L.D., Litaeva S.I. **1994**. [Age of active volcanoes in the Kuril-Kamchatka region]. *Vulkanologiya i seysmologiya = Volcanology and Seismology*, (4–5): 5–31.
4. Veselov O.V., Soinov V.V. **1997**. [Heat flow of the Sakhalin and the Kuril Islands]. In: *Struktura i veshchestvennyy sostav osadochnogo chekhla severo-zapada Tikhogo okeana [Structure and material composition of sedimentary cover of the northwest Pacific]*. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGiG DVO RAN, 153–176. (Geodinamika tektonosfery zony sochleneniya Tikhogo okeana s Evraziey = Geodynamics of tectonosphere of the Pacific-Eurasia conjunction zone; vol. 4). (In Russ.).
5. Gevorkyan P.S., Potemkin A.V., Eysymont I.M. **2016**. *Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika [Probability theory and mathematical statistics]*. Moscow: Fizmatlit, 176 p. (In Russ.).
6. *Geokhimiya magmaticheskikh porod okeana i zon sochleneniya okean–continent [Geochemistry of ocean igneous rocks and the ocean-continent transition zones]*. Eds. M.I. Kuz'min, L.V. Tauson. **1984**. Novosibirsk: Nauka, 181 p. (In Russ.). URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-geokhimiya-magmaticheskikh-porod-okeana-i-zon-sochleneniya-okean-kontinent.pdf> (accessed 12.01.2021).

7. Gorshkov G.S. **1967**. [*Volcanism of the Kuril island arc*]. Moscow: Nauka, 287 p. (In Russ.).
URL: http://repo.kscnet.ru/156/1/Gorshkov_1967.pdf (accessed 16.02.2021).
8. Davis J.C. **1986**. *Statistics and data analysis in geology*. New York: John Willey and Sons, 656 p.
9. Ermakov V.A., Pecherskiy D.M. **1989**. [The origin of gabbroid inclusions from young lavas in the Kuril Islands]. *Tikhookeanskaya geologiya = Geology of the Pacific Ocean*, 4: 45–55. (In Russ.).
10. Zharkov R.V. **2014**. *Thermal springs of the South Kuril Islands*. Vladivostok: Dal'nauka, 378 p. (In Russ.).
11. Zlobin T.K. **1987**. *Stroenie zemnoy kory i verkhney mantii Kuril'skoy ostrovnnoy dugi (po seysmicheskim dannym)* [*Structure of the Earth's crust and the upper mantle of the Kuril island arc (according to the seismological data)*]. Vladivostok: DVNTs AN SSSR [Far East Branch of the USSR Academy of Sciences], 150 p. (In Russ.).
12. Zlobin T.K., Fedorchenko V.I. **1982**. [Deep structure of the Golovnin volcano according to the data of study of earthquake converted-waves]. *Volcanology and Seismology*, 4: 99–103. (In Russ.).
13. Il'ev A.Ya., Kononov V.E., Veselov O.V. et al. **2009**. *Geologo-geofizicheskaya kharakteristika i perspektivy neftegazonosnosti Sredinno-Kuril'skogo progiba* [*Geological and geophysical characteristic and the perspectives of oil-gas bearing of the Middle Kurile Trough*]. Vladivostok: Dal'nauka, 141 p. (In Russ.).
14. Kozlov D.N. **2015**. *Kraternye ozera Kuril'skikh ostrovov* [*Crater lakes of Kuril Islands*]. Yuzhno-Sakhalinsk: Sakhalinskiy oblastnoy kraevedcheskiy muzey [Sakhalin Regional Museum]; IMGIG DVO RAN, 112 p. (In Russ.).
15. Kozlov D.N., Belousov A.B. **2007**. [Characteristics of tephra sedimentations of the last pseudovolcanic eruption in the Golovnin caldera (Kunashir, the Kuril Islands) – a key to assessment of future eruptions hazard]. In: *Izuchenie prirodnykh katastrof na Sakhaline i Kuril'skikh ostrovakh: sb. mat-lov I (XIX) Mezhdunar. konf. molodykh uchenykh, g. Yuzhno-Sakhalinsk, 15–20 iyunya 2006 g* [*Study of natural disasters on the Sakhalin and Kuril Islands: proceedings of the I (XIX) International conference of young scientists, Yuzhno-Sakhalinsk, June 15–20, 2006*]. Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, 164–166. (In Russ.).
16. Kozlov D.N., Zharkov R.V. **2010**. Morphology and genesis of the lakes of Golovnin and Zavaritsky calderal complexes (Kuril Islands). *Vestnik of the Far East Branch of the RAS*, 3: 103–106. (In Russ.).
URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17256284> (accessed 16.02.2021).
17. Kozlov D.N., Belousov A.B., Belousova M.G. **2008**. [Distribution of tephra of the Tyatya volcano eruption in 1973 (Kunashir Island, Kurila Islands)]. In: *Prirodnye katastrofy: izuchenie, monitoring, prognoz: vtoraya Sakhalinskaya molodezh. nauchnaya shkola, 4–10 iyunya 2007, Yuzhno-Sakhalinsk* [*Natural disasters: study, monitoring, forecast: the 2nd Sakhalin youth scientific school, June 4–10, 2007, Yuzhno-Sakhalinsk*]. Yuzhno-Sakhalinsk, 264–267. (In Russ.).
18. Martynov A.Y., Martynov Y.A. **2017**. Pleistocene basaltic volcanism of Kunashir Island (Kuril island arc): Mineralogy, geochemistry, and results of computer simulation. *Petrology*, 25(2): 206–225.
<https://doi.org/10.1134/s0869591117020035>
19. Markhinin E.K. **1959**. [The volcanoes of Kunashir Island]. In: *Vulkanizm Kamchatki i Kuril'skikh ostrovov* [*Volcanism of Kamchatka and Kuril Islands*]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 64–155. (In Russ.).
20. Melekestsev I.V. **2005**. [Recent ($N_2^2 - Q_4$) surface and underwater volcanism of the Kuril island arc]. In: *Noveyshiyy i sovremennyy vulkanizm na territorii Rossii* [*Recent and modern volcanism in Russia*] (ed. N.P. Laverov). Moscow: Nauka, 233–335. (In Russ.).
21. *Petrokhimiya kaynozoykskoy Kurilo-Kamchatskoy vulkanicheskoy provintsii* [*The petrochemistry of the Cenozoic Kuril-Kamchatka volcanic province*] (ed. E.N. Erlikh). **1966**. Moscow: Nauka, 278 p. (In Russ.).
22. Pecherskiy D.M., Bagin V.I., Brodskaya S.Yu., Sharonova Z.V. **1975**. *Magnetizm i usloviya obrazovaniya izverzhennykh gornykh porod* [*Magnetism and formation conditions of igneous rocks*]. Moscow: Nauka, 288 p. (In Russ.).
23. *Podvodnyy vulkanizm i zonal'nost' Kuril'skoy ostrovnnoy dugi* [*Underwater volcanism and zonality of the Kuril island arc*] (ed. Yu.M. Pushcharovskiy). **1992**. Moscow: Nauka, 527 p. (In Russ.).
URL: http://www.kscnet.ru/ivs/bibl/sotrudn/avdeiko/mon_a_v/ (accessed 16.02.2021).
24. Razzhigaeva N.G., Ganzey L.A. **2006**. *Sedimentary environments on islands in Pleistocene-Holocene*. Vladivostok: Dal'nauka, 247 p. (In Russ.).
25. Rasskazov S.V., Demonterova E.I., Ivanov A.V., Brandt I.S., Brandt S.V. **2007**. *Evolyutsiya pozdnekaynozoykskogo magmatizma na granitse Tuvino-Mongol'skogo massiva (Vostochnaya Tuva)* [*Evolution of the Late Cenozoic magmatism at the boundary of the Tuva-Mongol massif (East Tuva)*]. Irkutsk: IZK SO RAN, 161 p. (In Russ.).
26. Rybin A.V., Piskunov B.N. **1991**. [On petrochemical affinity of the composition of intrusive and effusive rocks of Kuril Islands (on the example of Kunashir Island)]. In: [*Geology, metallogeny, and hydrogeology of the Sakhalin and Kuril Islands*]. Vladivostok: DVO RAN = FEB RAS, 82–90. (In Russ.).
27. Rybin A.V., Chibisova M.V., Degtarev A.V., Gur'yanov V.B. **2017**. Volcanic eruptions in the Kuril Islands during XXI century. *Vestnik DVO RAN = Vestnik of the Far East Branch of the RAS*, 1: 51–61. (In Russ.).
URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30079298> (accessed 16.02.2021).

28. Sergeev K.F. **1976.** *Tektonika Kuril'skoy ostrovnnoy sistemy* [Tectonics of the Kuril Island system]. Moscow: Nauka, 240 p. (In Russ.). URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-tektonika-kurilskoy-ostrovnnoy-sistemy.pdf> (accessed 16.02.2021).
29. Syvorotkin V.L. **1996.** *Korovye vulkany Kurilo-Kamchatskoy ostrovnnoy dugi* [Crustal volcanoes of the Kuril-Kamchatka island arc]. Moscow: Geoinformmark, 52 p. (In Russ.).
30. Fazlullin S.M., Batoyan V.V. **1989.** [Bottom sediments of the Golovnin volcano crater lake]. *Volcanology and Seismology*, 2: 44–55. (In Russ.).
31. Fedorchenko V.I. **1962.** [Main stages of the post-Caldera period of the Golovnin volcano development (Kunashir Island)]. In: *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics]. Yuzhno-Sakhalinsk, 127–142. (Trudy SakhK-NII; Iss. 12). (In Russ.).
32. Fedorchenko V.I., Abdurakhmanov A.I., Rodionova R.I. **1989.** *Vulkanizm Kuril'skoy ostrovnnoy dugi: geologiya i petrogenезis* [Volcanism of the Kuril island arc: geology and petrogenesis]. Moscow: Nauka, 239 p. (In Russ.).
33. Frolova T.I., Burikova I.A., Gushchin A.V., Frolov V.T., Syvorotkin V.L. **1985.** *Proiskhozhdenie vulkanicheskikh seriy ostrovnnykh dug* [Origin of the island arcs volcanic series]. Moscow: Nedra, 275 p. (In Russ.).
34. Frolova T.I., Perchuk L.L., Burikova I.A. **1989.** *Magmatizm i preobrazovanie zemnoy kory aktivnykh okrain* [Magmatism and transformation of active margins of the Earth's crust]. Moscow: Nedra, 261 p. (In Russ.).
35. Belousov A., Belousova M., Kozlov D. **2017.** Strong hydrothermal eruption 600 BP inside Golovnin caldera, Kunashir Island, Kurile arc. In: *19th EGU General Assembly, EGU2017: Proceedings from the conference held 23–28 April, 2017 in Vienna, Austria*, p. 7596.
36. Falloon T.J., Danyushevsky L.V., Green D.H. **2001.** Peridotite melting at 1 GPa: Reversal experiments on partial melt compositions produced by peridotite-basalt sandwich experiments. *J. Petrology*, 42 (12): 2363–2390. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.12.2363>
37. Kozlov D., Belousov A. **2006.** Hydrothermal eruption – the most probable scenario of volcanic disaster in the Golovnina Caldera, Kunashir Island, Southern Kuriles. In: *5th Biennial Workshop on Subduction Processes emphasizing the Japan-Kuril-Kamchatka-Aleutian Arcs (JKASP-5) and International Volcanological Field School for Graduate Students Japan, 9–14 July 2006, Sapporo, Japan*. Sapporo: Hokkaido Univ. Int., 140–141.
38. Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B. **1986.** A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J. of Petrology*, 27(3): 745–750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>
39. Lee C.-T.A., Chin E.J. **2014.** Calculating melting temperatures and pressures of peridotite protoliths: implication for the origin of cratonic mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 403: 273–286. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.06.048>
40. Miyashiro A. **1974.** Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American J. of Science*, 274(4): 321–355. <https://doi.org/10.2475/ajs.274.4.321>

Об авторах

КАЗАКОВ Артем Иванович (ORCID 0000-0002-1378-185X), ведущий инженер лаборатории вулканологии и вулканопасности, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН), г. Южно-Сахалинск, legn@inbox.ru

ВЕСЕЛОВ Олег Васильевич (ORCID 0000-0003-3151-324X), кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Южно-Сахалинск, o.veselov@imgg.ru

КОЗЛОВ Дмитрий Николаевич (ORCID 0000-0002-8640-086X), кандидат географических наук, старший научный сотрудник лаборатории вулканологии и вулканопасности, Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Южно-Сахалинск, kozlovdn@bk.ru

About the Authors

KAZAKOV Artem I. (ORCID 0000-0002-1378-185X), Senior Engineer of the Laboratory of volcanology and volcano hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (IMGG FEB RAS), Yuzhno-Sakhalinsk, legn@inbox.ru

VESELOV Oleg V. (ORCID 0000-0003-3151-324X), Cand. Sci. (Geol. and Miner.), Leading Researcher of the Laboratory of volcanology and volcano hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (IMGG FEB RAS), Yuzhno-Sakhalinsk, o.veselov@imgg.ru

KOZLOV Dmitry N. (ORCID 0000-0002-8640-086X), Cand. Sci. (Geogr.), Senior Researcher of the Laboratory of volcanology and volcano hazard, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (IMGG FEB RAS), Yuzhno-Sakhalinsk, kozlovdn@bk.ru