



<https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0443>

## THE ANALYSIS OF SPATIAL DISTRIBUTIONS, ORIGINS OF CALDERA-FORMING ERUPTIONS WITH BASALTIC-ANDESITIC MAGMA COMPOSITIONS, AND GENESIS OF MIOCENE IGNIMBRITES OF THE EASTERN VOLCANIC BELT, KAMCHATKA

O. V. Bergal-Kuvikas<sup>1, 2</sup>, A. N. Rogozin<sup>1</sup>, E. S. Klyapitsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

<sup>2</sup> *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of RAS, Moscow, Russia*

**Abstract:** Based on the statistical data of the Global Volcanism Program of the Smithsonian Institution and published materials, we present a comparative analysis of caldera-forming eruptions on global scale. The geodynamic settings and genesis of the caldera-forming eruptions with basaltic-andesitic magma compositions are described. The origin of the majority of mafic ignimbrites was related with external water. Such ignimbrites were generated in a submarine environment or with a contact with water. The newly obtained data, paleogeodynamic reconstruction and geological mapping of Miocene mafic ignimbrites of the Eastern volcanic belt (EVB) of Kamchatka confirm their genesis in costal-marine environment. These new data show significance of paleoreconstructions in studies of paleo-volcanoes and relief-forming pyroclastic rocks.

**Key words:** basaltic-andesitic ignimbrites; calderas; submarine eruptions; Eastern volcanic belt; Kamchatka

### RESEARCH ARTICLE

**Received:** October 31, 2018

**Revised:** June 5, 2019

**Accepted:** July 7, 2019

**For citation:** Bergal-Kuvikas O.V., Rogozin A.N., Klyapitsky E.S., 2019. The analysis of spatial distributions, origins of caldera-forming eruptions with basaltic-andesitic magma compositions, and genesis of Miocene ignimbrites of the Eastern volcanic belt, Kamchatka. *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (3), 815–828. doi:10.5800/GT-2019-10-3-0443.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ПРОИСХОЖДЕНИЯ КАЛЬДЕР С БАЗАЛЬТ-АНДЕЗИТОВЫМ СОСТАВОМ МАГМ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГЕНЕЗИСА МИОЦЕНОВЫХ ИГНИМБРИТОВ ВОСТОЧНОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПОЯСА КАМЧАТКИ

О. В. Бергаль-Кувикас<sup>1,2</sup>, А. Н. Рогозин<sup>1</sup>, Е. С. Кляпицкий<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

**Аннотация:** На основе статистической обработки базы данных Глобальной программы вулканизма (ГПВ) Смитсоновского института и опубликованных материалов представлен сравнительный анализ кальдерообразующих извержений вулканов Земли. Показаны геодинамические позиции и условия формирования кальдер с базальт-андезитовым составом магм. В основном искомые кальдеры – это щитовые вулканы. Большинство из них имеют массивные лавовые потоки, только в нескольких случаях были описаны игнимбриты с базальт-андезитовым составом магм. Объединяющими признаками происхождения базальт-андезитовых игнимбритов являются контакты горячего пирокластического потока с «внешней» водой. Палеогеодинамические реконструкции Камчатки миоценового времени и анализ материалов геологического картирования базальт-андезитовых игнимбритов Восточного вулканического пояса Камчатки подтверждают их образование в прибрежно-морской обстановке, что согласуется с приведенными результатами изучения происхождения базальт-андезитовых игнимбритов вулканов в других регионах Земли. Полученные данные показывают значимость реконструкций палеогеодинамических обстановок в изучении типов палеовулканов и рельефообразующих пирокластических пород.

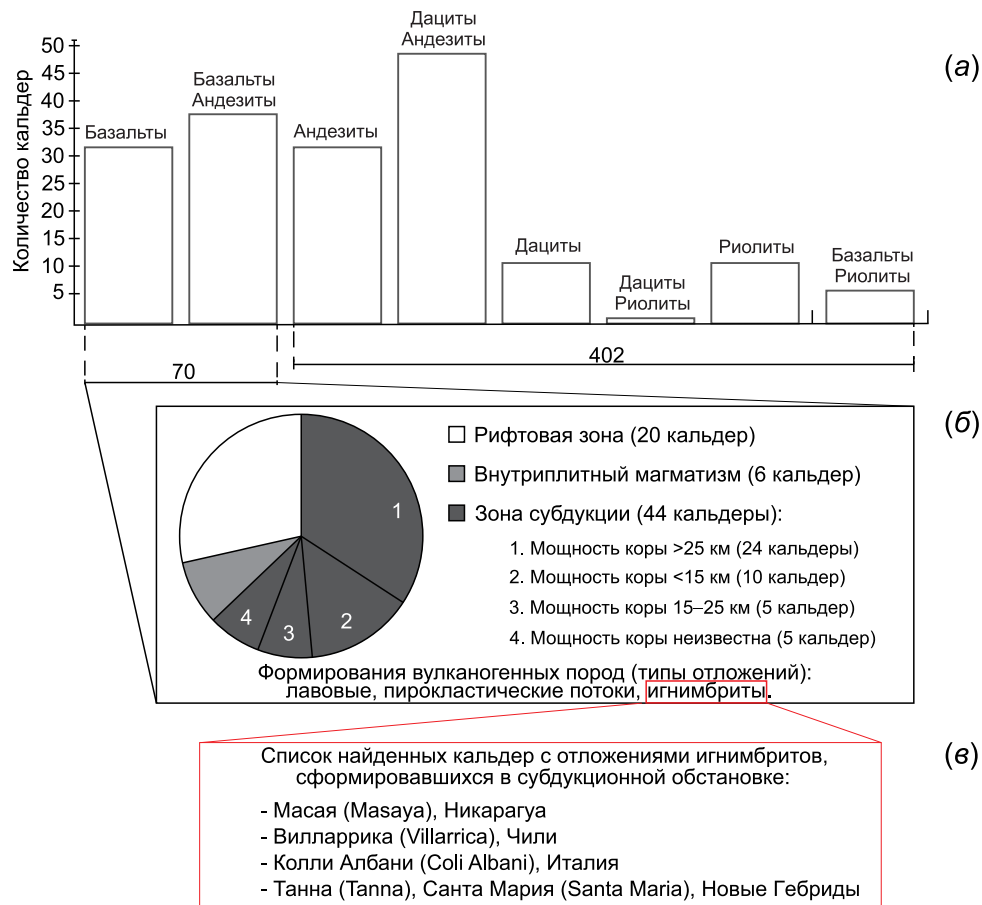
**Ключевые слова:** базальт-андезитовые игнимбриты; кальдеры; подводные извержения; Восточный вулканический пояс Камчатки

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Извержения супервулканов по разрушительной силе сопоставимы со столкновением с Землей небольшого астероида, а выбросы раскаленной лавы, газов и пепла приводят к изменению климата [Abbot, Fowle, 1913; Oppenheimer, 2003; Schmidt et al., 2002; Bindeman, 2006; Gleckler et al., 2006; Lind, Wastegård, 2011; и др.]. Хорошо известны последствия катастрофического извержения вулкана Тамбора (Индонезия) в 1815 г. 1816 год стал известен как «год без лета» из-за небывало низких температур, которые установились в Европе и Северной Америке. Необычайный холод привел к катастрофическому неурожаю. Весной 1817 г. цены на зерно выросли в десять раз, а среди населения разразился голод [Oppenheimer, 2003]. В результате извержения Кракатау (Индонезия) в 1883 г. сформировалось цунами, которое погубило более 120000 человек. Годом позже, после извержения в 1884 г., было зафиксировано снижение глобальной температуры на 1.2 °C [Simkin, Fiske, 1983].

В последние 15 лет в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН под руководством к.г.-м.н.

В.Л. Леонова велись работы по обнаружению древних кальдерных комплексов Камчатки, источников мощных игнимбритовых покровов [Melekestsev, 1974; Leonov, Grib, 2004]. Так, благодаря детальному геологическому картированию на Южной Камчатке удалось обнаружить кальдеру супервулкана Карымшина и реконструировать гигантский пирокластический поток, связанный с этой кальдерой [Leonov, Rogozin, 2007]. С 2009 г. ведутся работы по изучению обнаруженной Верхнеавачинской кальдеры, расположенной в верховье рек Левая Авача и Кавыча в Восточном вулканическом поясе (ВВП) Камчатки [Leonov et al., 2011]. Сравнение химического состава игнимбритов Верхнеавачинской кальдеры с составом пирокластических пород других кальдерных комплексов Камчатки показало, что изучаемые игнимбритовые толщи относятся к наиболее основным сериям пород [Rogozin et al., 2011]. Если для кислых, кальдерообразующих извержений на примере многих вулканов мира изучены процессы, формирующие игнимбритовые толщи, то вопрос образования кальдер с базальт-андезитовым составом пород до сих пор остается дискуссионным [Freundt, Schmincke, 1995; Walker,



**Рис. 1.** Иллюстрация методики выборки кальдер по данным ГВП: (а) – график классификации кальдер по содержанию кремнекислоты; (б) – диаграмма геодинамической классификации кальдер с базальт-андезитовым составом магм; (в) – список кальдер с базальт-андезитовым составом игнимбритов.

**Fig. 1.** Illustrations showing the caldera selection method using the statistical data of Global Volcanism Program: (а) – classification of calderas by silicic acid concentrations; (б) – geodynamic classification of calderas with basaltic-andesitic magma compositions; (в) – list of calderas with basaltic-andesitic compositions of ignimbrites.

1988; Walker et al., 1993]. Таким образом, главная задача данного исследования заключается в изучении генезиса базальт-андезитовых игнимбритов, обнаруженных в ВВП.

## 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для сбора информации об игнимбритах основных и средних составов использовался статистический анализ базы данных ГВП (Global Volcanism Program) Смитсоновского института (г. Вашингтон, США) [Global Volcanism Program, 2017] (рис. 1). Это современный архив, включающий в себя информацию обо всех известных вулканах мира. С помощью фильтра «Caldera» было отобрано более 400 объектов для исследования. Далее выбранные объекты были сортированы по содержанию кремнекислоты на восемь групп вне зависимости от геодинамической обстановки их формирования (рис. 1, а). По-

дробно методика обработки материала описана в работе [Hughes, Mahood, 2008] для изучения происхождения кальдер с кислым составом магм. В нашей публикации мы используем схожий метод, целенаправленно изучая кальдеры с базальт-андезитовым составом магм. В результате проведенных работ было выбрано 70 объектов для дальнейшего изучения, попадающих в группы «базальты», «базальты и андезиты» (рис. 1, а). Для поисков игнимбритов из указанной выборки кальдер были изучены типы генерируемых пород для каждого объекта (рис. 1, б). В указанные критерии поиска в основном попали щитовые кальдеры с массивными лавовыми потоками. Тем не менее нам удалось обнаружить несколько кальдер с базальт-андезитовыми игнимбритами (рис. 1, в). Далее мы конкретно изучали только найденные объекты, уделяя особое внимание условиям генерации столь необычных пород.

В основе работы лежат результаты многолетних полевых работ на ВВП Камчатки. Особое внимание

было уделено картированию контактов игнимбри- тов, изучению особенностей залегания магматиче- ских пород и их соотношений с другими геологиче- скими сериями.

Для анализа статистической базы данных миро- вых вулканов и интерпретации полученных данных для изучения игнимбри- тов на ВВП использовались многочисленные опубликованные данные по опи- санию осадочных толщ Камчатки [Gladenkov et al., 1990; Gladenkov A.Y., Gladenkov Y.B., 2004; Geological map..., 2000; Map of Modern Tectonics..., 1977; Map of Principal Trends..., 1983; Shantser, Kraevaya, 1980].

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### 3.1. РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ КАЛЬДЕР С БАЗАЛЬТ-АНДЕЗИТОВЫМ СОСТАВОМ МАГМ

Обычно образование кальдер и извержения большой мощности связывают с участками ост- ровных дуг или активных окраин континентов, где уже сформированы комплексы коры континен- тального типа [Chesner et al., 1991; Druitt, Sparks, 1984; Huppert, Sparks, 1988]. В пределах этих ком- плексов создаются условия для возникновения и сегрегации больших количеств кислых расплавов, обогащенных летучими [Bindeman, Simakin, 2014; Marti et al., 2008; Miller, Wark, 2008; Cashman, Giordano, 2014]. Выборка из ГПВ включает в себя информацию о 402 таких кальдерах с вариациями состава от андезитов до риолитов (рис. 1, а).

Пять кальдерных комплексов (Большой Семя- чик на Камчатке, Боре Але (Bore Ale) в Эфиопии, Копахуе (Corahue) в Чили, Куттара (Kuttara) и Тоа (Toa) в Японии) сформировались после внедрения основной магмы в кислый магматический очаг и имеют широкий диапазон вариаций магм от ба- зальтов до риолитов (рис. 1, а). Принято считать, что внедрение основной магмы в кислый магмати- ческий очаг может служить спусковым механизмом для начала катастрофического извержения [Wil- liams, 1941; Sparks et al., 1977; Lipman, 1984]. Так, например, во время извержения вулкана Ринджани (Rinjani) в Индонезии в 1257 г. состав продуктов извержений менялся от кислого до более основно- го [Rachmat et al., 2016]. На Камчатке во время формирования кальдеры вулкана Пра-Карымский (7800 л.н.) наблюдались полосчатые пемзы, свиде- тельствующие о смешении разных кислых и более основных магматических расплавов [Braitseva, Melekestsev, 1991; Eichelberger, Izbekov, 2000; Kuvikas, 2008].

По данным ГПВ только 70 кальдер имеют ба- зальт-андезитовый состав пород вне зависимости от геодинамических обстановок их формирования

и типов формируемых пород (лавовых или пиро- кластических потоков, игнимбри- тов и т.д.). При этом их размер варьируется от 5 до 12 км [Global Volcanism Program, 2017]. Большинство кальдер с базальт-андезитовым составом пород приурочены к островным дугам с мощной корой (рис. 1, б), например Ломас Бланкас (Lomas Blancas) в Чили, Агриган (Agrigan) в Тайване и Баррен (Barren) в Индии и многие другие.

Вопрос о происхождении кальдер с основным и средним составом изверженных пород до сих оста- ется дискуссионным. В островодужных обстанов- ках образование кальдер связывают с аккумуляци- ей магмы в приповерхностных магматических оча- гах, насыщением летучими компонентами и даль- нейшими эксплозивными извержениями с доми- нированием пирокластических пород в большей степени, чем эффузивных. Так, длительные процес- сы аккумуляции и дегазации магмы, происходящие порядка 4–5 тысяч лет в коровых магматических очагах вулкана Тамбора, по мнению Р. Гердиси- ра [Gertisser et al., 2011], были причиной эксплозивно- го, кальдерообразующего извержения основных пород в 1815 г. Опустошенность приповерхностно- го магматического резервуара в результате объем- ного извержения привела к просадке кровли и об- разованию кальдер на вулканах Агриган (Agrigan) [Stern, 1979], Баррен [Sheth et al., 2009], Льяйма (Llaima) [Lohmar et al., 2007] и Гау (Gaua) [Beaumais et al., 2016]. Однако А. Гудмундссон [Gudmundsson, 2015; 2016] считает, что провал кровли магмати- ческого очага способен образоваться в результате формирования грабена. Этот процесс приводит к вытеснению магмы из магматической камеры и последующему масштабному извержению.

На Земле существует только несколько кальдер с игнимбри- тами основного и среднего состава (рис. 1, в). Одна из них кальдера Масая (Masaya Caldera) в Никарагуа [Williams, 1941; Fernández, 2007] и не- сколько голоценовых кальдер в Вануату, Новые Гебриды [Robin et al., 1993, 1994; Witter, Self, 2007]. На примере изучения необычных игнимбри- тов на Вануату К. Робин с соавторами [Robin et al., 1995] связывают их формирование с контактами горячей магмы с холодной водой в результате сейсмиче- ских событий. Схожего мнения об образовании ос- новных игнимбри- тов при гидротермально-магма- тических взрывах придерживаются С. Лохмар с со- авторами [Lohmar et al., 2007], изучающие игним- бри- ты Ликан (Licán Ignimbrite) вулкана Вилларри- ка (Villarrica) в Чили. Базальтовые игнимбри- ты вулкана Колли Албани (Colli Albani) в Италии также образовались при контакте магм с озером либо ла- гуной [De Rita et al., 2002]. Важно отметить, что все вышеперечисленные кальдеры имеют размер кра- теров от 5 до 12 км, в то время как маары и туфо-

вые кольца с основным составом магм не достигают и сотен метров в диаметре [Demonteirova et al., 2009; Gutmann, 2002]. Перечисленные кальдеры с базальт-андезитовым составом игнимбригов, в отличие от одноактных мааров, образовались в результате многочисленных объемных выбросов магматического материала. Важную роль в генерации кальдер подобного рода играет наличие «внешней» воды на поверхности Земли различного происхождения (морской воды для кальдер Новых Гебрид [Robin et al., 1993, 1994, 1995; Witter, Self, 2007] и озера или лагуны для кальдеры Колли Албани в Италии [De Rita et al., 2002]). Таким образом, в результате проведенного нами анализа были найдены кальдеры, объединяющими признаками которых был базальт-андезитовый состав игнимбригов и формирование в прибрежно-морской либо в подводной обстановке.

### 3.2. ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ К ВОПРОСУ О ПРОИСХОЖДЕНИИ БАЗАЛЬТ-АНДЕЗИТОВЫХ ИГНИМБРИГОВ ВВП НА КАМЧАТКЕ

Камчатка – это классическая активная континентальная окраина чилийского типа [Stern, 2002; Fedorov et al., 2008]. История развития региона осложнена аккрецией террейнов Кроноцкой палеодуги [Avdeiko et al., 2007; Avdeiko, Bergal-Kuvikas, 2015; Lander, Shapiro, 2007]. Большинство действующих и потенциально активных вулканов Камчатки расположено в пределах ВВП, характеристика которого была дана еще А.Н. Заварицким [Zavaritsky, 1955]. Длина ВВП ~850 км, ширина – 50–100 км, общее простирание северо-северо-восточное (рис. 2, а). По данным Г.П. Авдейко с соавторами [Avdeiko et al., 2003; Avdeiko, Bergal-Kuvikas, 2015], ВВП начал формироваться в конце миоцена, фиксируя собой начальный этап образования Курило-Камчатской зоны субдукции в результате приращения Кроноцкой палеодуги.

Первые подробные сведения об игнимбригах ВВП были опубликованы в монографии А.Е. Шанцера и Т.С. Краевой [Shantser, Kraevaya, 1980], которые связывали их с Верхнеавачинской купольно-кольцевой структурой. В этом же районе А.А. Алискеров [Aliskerov, 1980] выделял Авачинско-Кетхойскую зону поднятий, а О.Н. Егоров [Egorov, 2009] описывал Авачинско-Ганальский центр эндогенной активности. После появления в последние годы понятия о супервулканах и открытия первого супервулкана на Камчатке [Leonov, Rogozin, 2007] В.Л. Леоновым было сделано предположение, что в районе верховьев рек Авача и Кавыча на ВВП может быть выявлен еще один супервулкан, получивший в дальнейшем название «Верхнеавачинская кальдера» [Leonov et al., 2011]. Важно отметить,

что подобные игнимбриги были описаны А.Е. Шанцером и Т.С. Краевой [Shantser, Kraevaya, 1980] в многочисленных обнажениях ВВП, в частности в верховьях рек Левая Жупанова, Правая Жупанова, Гаванка, Дзензур, Шумная и Карымская. Так же особо примечательны столбчатые отдельности игнимбригов горы Стол, которая находится в 50 км северо-восточнее Верхнеавачинской кальдеры [Leonov et al., 2008] (рис. 2, б).

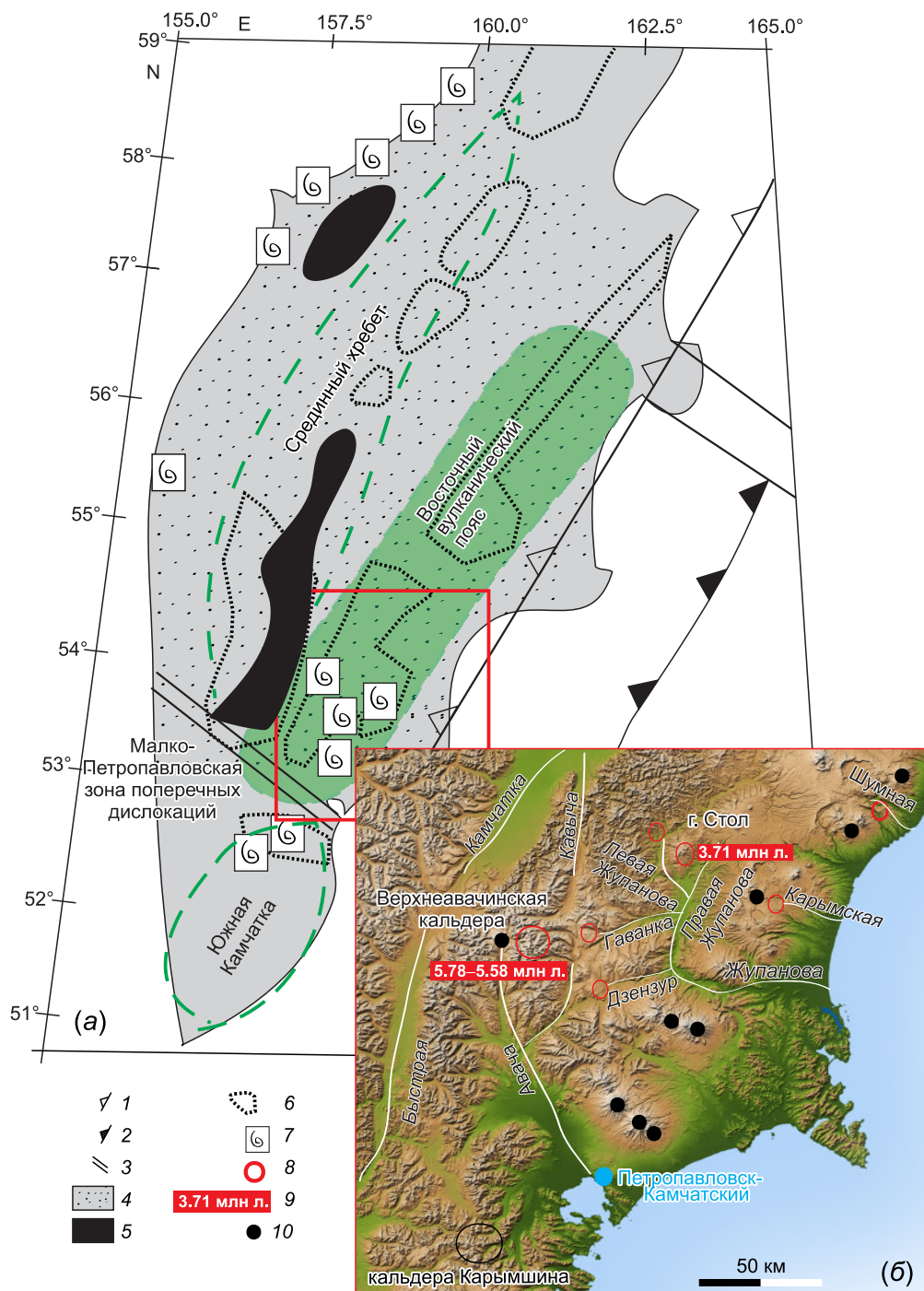
### 3.3. ПОИСКИ «ВНЕШНЕЙ» ВОДЫ НА КАМЧАТКЕ В МИОЦЕНЕ

Статистический анализ выборки из базы данных ГПВ, включающий в себя более 400 объектов, расположенных по всему миру, и обзор опубликованной литературы по исследуемому вопросу позволили нам выделить всего несколько кальдер с игнимбригами базальт-андезитового состава. Объединяющими признаками найденных объектов были свидетельства влияний «внешней» воды и образования игнимбригов основного состава под водой либо при контакте горячего пирокластического материала с холодной водой, ведущем к мгновенному спеканию пород с образованием столбчатых отдельностей в игнимбригах. Таким образом, мы направили наше исследование на поиски следов «внешней» воды в пределах ВВП.

Возраст образования изучаемых игнимбригов ВВП по данным Ar-Ar датирования – верхний миоцен [Leonov et al., 2008, 2011]. По мнению Б. Хаг с соавторами [Haq et al., 1987], начавшееся потепление 6 млн л.н. привело к подъему уровня моря более чем на 70 м выше нынешнего, в результате чего произошло образование Берингова пролива [Gladenkov A.Y., Gladenkov Y.B., 2004]. Более того, в нижней части среднего миоцена и в конце среднего – начале позднего миоцена, что соответствует первому и второму неогеновому оптимуму по данным [Gladenkov et al., 1990], на территории современной Камчатки наблюдались миграции тропических, тепловодных фораминифер и моллюсков. Поскольку современный ВВП испытывает значительный подъем территории, контакт миоценовых магматических пород с «внешней» водой становится вполне реалистичным (рис. 3).

### 3.4. СВИДЕТЕЛЬСТВА ВОЗДЕЙСТВИЯ «ВНЕШНЕЙ» ВОДЫ НА ОБРАЗОВАНИЕ МАГМАТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ВВП В МИОЦЕНЕ

Полевые работы при картировании Верхнеавачинской кальдеры явно свидетельствуют об образовании пород в прибрежно-морских условиях. Так, естественные обнажения 500-метровой мощности представляют собой переслаивающиеся игнимбриги с классической столбчатой отдельностью и

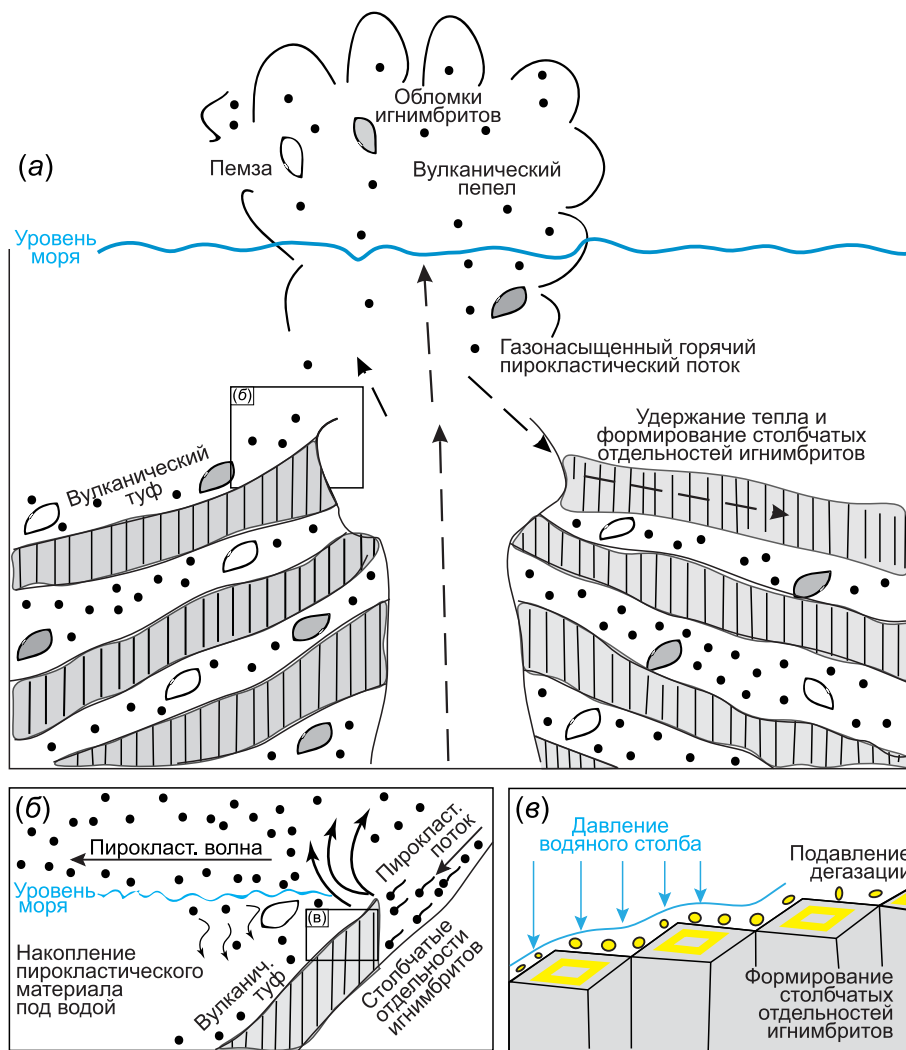


**Рис. 2.** Геолого-геофизическая позиция Камчатки: (а) – общий региональный вид; (б) – врезка с местоположением игнимбритов ВВП с базальт-андезитовым составом магм.

1 – расположение палеожелоба по данным [Avdeiko et al., 2007; Lander, Shapiro, 2007]; 2 – расположение современного желоба; 3 – трансформные разломы; 4 – абразионно-аккумулятивные, эрозионно-денудационные отложения континентального склона [Map..., 1983]; 5 – неогеновые лавовые потоки [Map..., 1983]; 6 – территории активного подъема по данным [Map..., 1977]; 7 – моллюски олигоцен-миоценового возраста (33.90–5.33 млн л.) [Gladenkov et al., 1990; Geological Map..., 2000]; 8 – игнимбриты основного и среднего состава [Shanser, Kraevaya, 1980]; 9 – Ar-Ar датирование игнимбритов с основным и средним составом магм [Leonov et al., 2008, 2011]; 10 – голоценовые вулканы ВВП.

**Fig. 2.** Geological and geophysical position of Kamchatka: (а) – general regional view; (б) – locations of the EVB ignimbrites with the basaltic-andesitic magma compositions.

1 – location of the paleochannel (after [Avdeiko et al., 2007; Lander, Shapiro, 2007]); 2 – location of the modern channel; 3 – transform faults; 4 – abrasion-accumulation, erosion-denudation deposits of the continental slope [Map..., 1983]; 5 – Neogene lava flows [Map..., 1983]; 6 – active uplifting areas (after [Map..., 1977]); 7 – Oligocene–Miocene mollusks (33.90–5.33 Ma) [Gladenkov et al., 1990; Geological Map..., 2000]; 8 – ignimbrites of basic and medium compositions [Shanser, Kraevaya, 1980]; 9 – Ar-Ar ages of ignimbrites with basic and medium magma compositions [Leonov et al., 2008, 2011]; 10 – Holocene volcanoes of EVP.



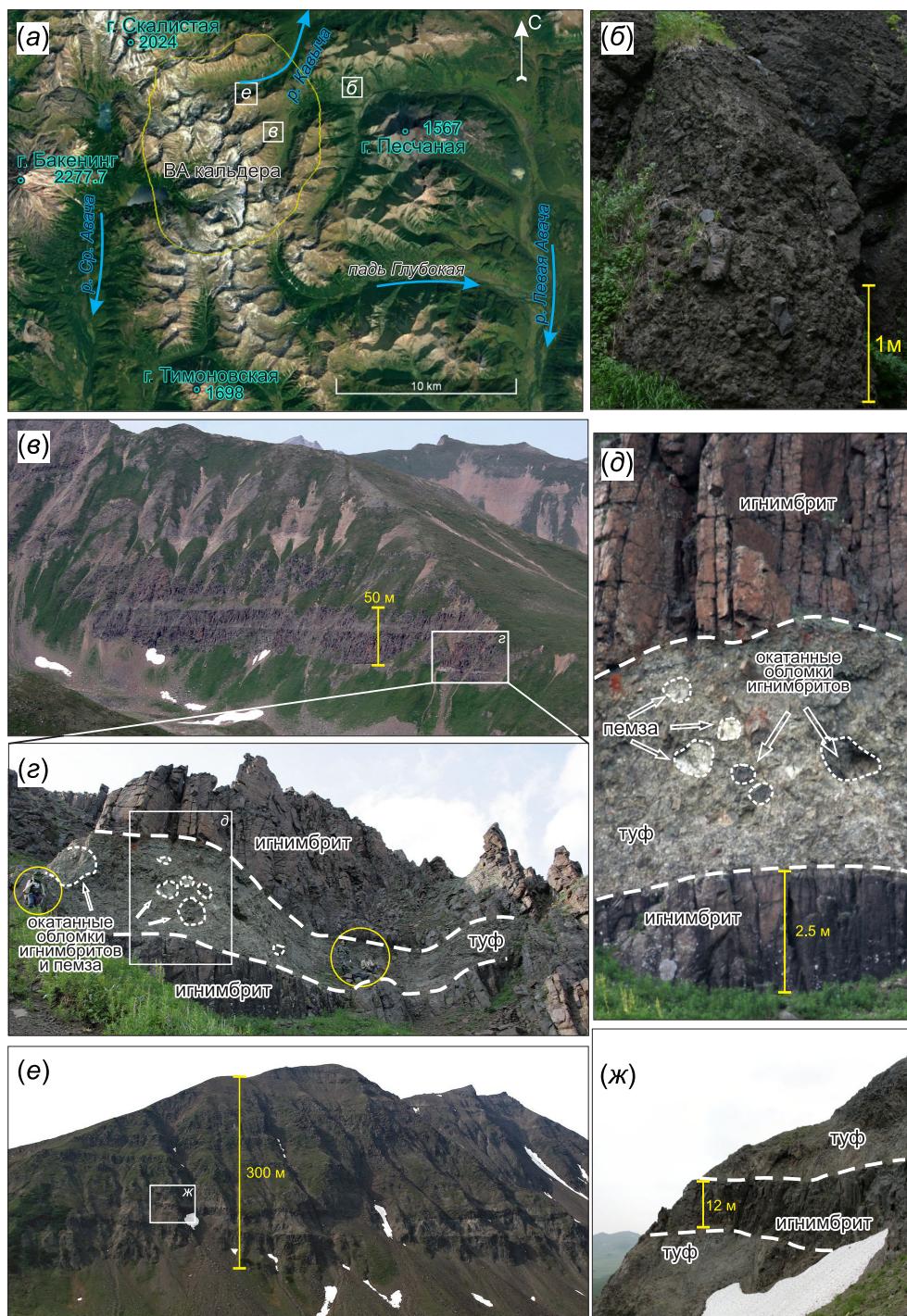
**Рис. 3.** Схема формирования переслаивающихся прослоев игнимбритов и туфов Верхнеавачинской кальдеры: (а) – общая модель формирования; (б)–(в) – механизм формирования столбчатых отдельностей под водой, согласно моделям [Freundt, 2003; Cas, Simmons, 2018].

**Fig. 3.** Formation of the interbedded layers of ignimbrites and tuffs of the Upper Avacha caldera: (a) – general model; (б)–(в) – formation mechanism of columnar structures under water (according to the models described in [Freundt, 2003; Cas, Simmons, 2018]).

измененные туфы с окатанными глыбами и валунами диаметром более 50 см (рис. 4). Схожесть их составов и структур залегания свидетельствует о едином генезисе. Однако наличие окатанных валунов с незаостренными краями в туфах явно говорит о действии воды в процессе транспортировки или аккумуляции. Механизм образования подобных переслаивающихся толщ в прибрежно-морских условиях был подробно рассмотрен в работе [Cas, Wright, 1991] при описании образования вулканической группы Фишгард (Fishguard volcanic group).

Другим примером взаимодействия «внешней» воды при накоплении вулканического материала можно назвать гору Стол. Это обособленная возвышенность в 50 км северо-восточнее Верхнеавачинской кальдеры (рис. 5) с плоской вершиной

на левом борту долины р. Левая Жупанова, получившая свое название за относительно ровную поверхность, образованную в результате бронирования вершины массивными оливинсодержащими базальтовыми лавами (рис. 5, а, б, в). Нижняя часть обнажения горы Стол представлена агломератовыми, псефитовыми туфами, гальками и валунами. Верхняя часть состоит из переслаивающихся прослоев алевролитов, песчаников, игнимбритов и лавовых потоков (рис. 5, г). Особо примечательны столбчатые отдельности игнимбритов горы Стол в виде крутых обрывов в средней части разреза (рис. 5, д). Между прослоями игнимбритов были обнаружены линзы окатанных валунов и галек (рис. 5, е). Дополнительным свидетельством подводной обстановки осадконакопления явля-



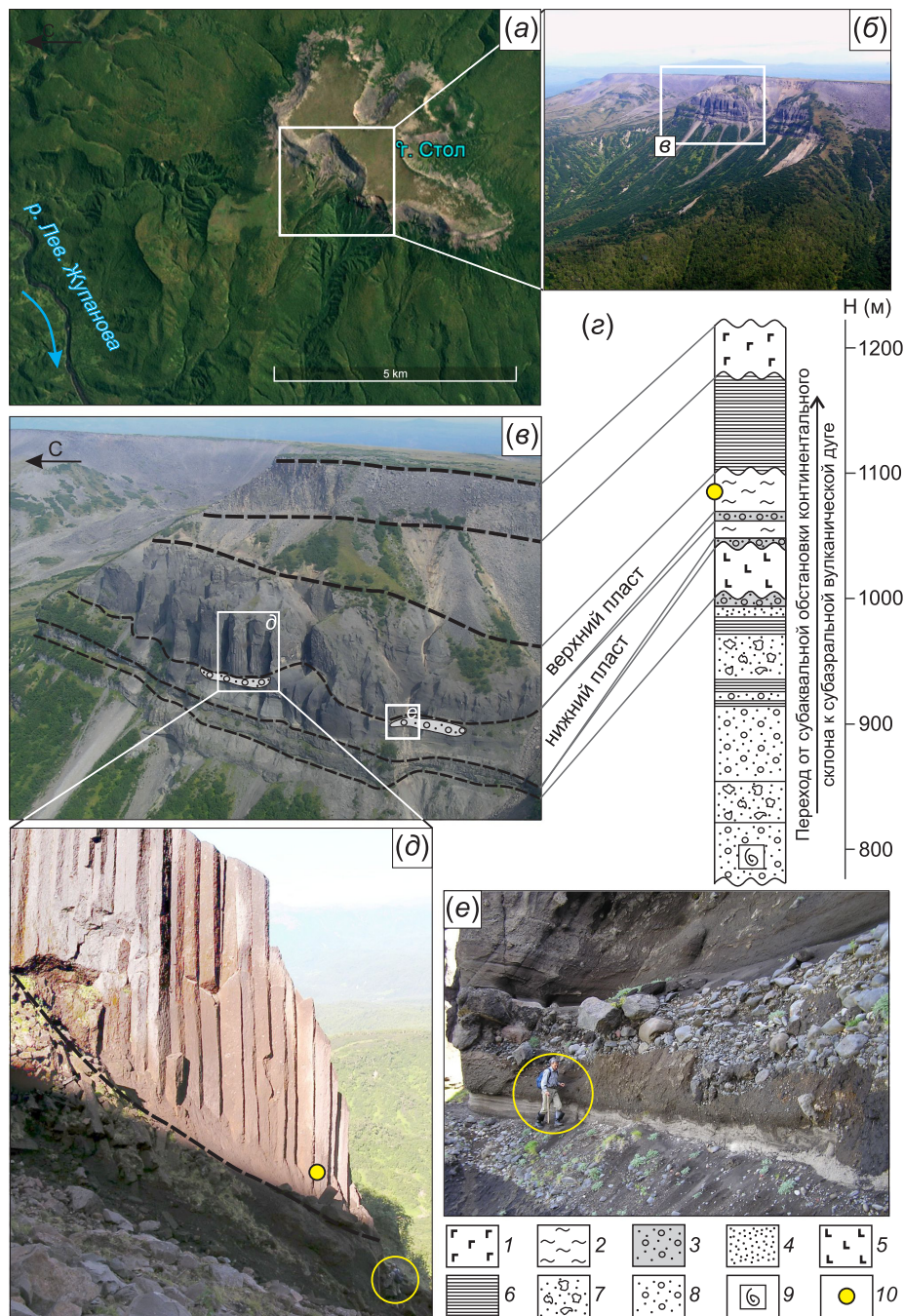
**Рис. 4.** Обнажения Верхнеавачинской кальдеры: (а) – местоположение Верхнеавачинской кальдеры (ВА) (показано желтым контуром); (б) – гиалокластиты в основании кальдеры; (в)–(ж) – представители обнажения кальдеры с переслаивающимися прослоями игнимбритов и измененных туфов с окатанными обломками игнимбритов, пемз.

**Fig. 4.** Outcrops of the Upper Avacha caldera: (а) – location of the Upper Avacha (ВА) caldera (yellow contour); (б) – hyaloclastites at the caldera’s base; (в)–(ж) – representative outcrops of the caldera with interlayers of ignimbrites and altered tuffs with rounded fragments of ignimbrites and pumice stones.

ются моллюски, найденные в основании горы Стол [Shanser, 1974; Shanser, Kraevaya, 1980]. Как было отмечено выше, вершину горы Стол бронируют массивные оливинсодержащие базальтовые лавы, которые и завершают переход от субэквальной об-

становки континентального склона к субэральной вулканической дуге ВВП (рис. 5) [Shanser, 1974]. Возраст игнимбритов горы Стол оценивается в 3.71 млн л. с основным – средним составом вулканитов (56–57 мас. % SiO<sub>2</sub>) [Leonov et al., 2008;





**Рис. 5.** Сводный стратиграфический разрез пород горы Стол (по [Leonov et al., 2008], с дополнениями авторов).

(a) – общий вид на гору Стол; (б) – поверхность горы Стол, фото В.Л. Леонова; (в) – западный склон горы Стол. Линии пунктиром – корреляция пород по разрезу (z), фото В.Л. Леонова; (z) – стратиграфический разрез пород горы Стол: 1 – массивные оливино-содержащие базальтовые лавы; 2 – игнимбристы; 3 – валуны, гальки; 4 – пепловый туф; 5 – мегаплагиофировые базальты; 6 – преимущественно алевролиты и песчаники; 7 – агломератные и псепфитовые туфы; 8 – туфы с галькой и валунами; 9 – находки ископаемой фауны по данным [Shantser, 1974; Shantser, Kraevaya, 1980]; 10 – отобранный на Ar-Ar датирование образец игнимбристов [Leonov et al., 2008]; (д) – обнажение игнимбристов, фото А.Н. Рогозина. Линия пунктиром – граница между игнимбристами верхнего пласта и конгломератами; (е) – вскрытая толща на границе между двумя пластами игнимбристов, состоящая из слоев конгломератов и пепловых туфов, фото А.Н. Рогозина.

**Fig. 5.** Stratigraphic section of the rocks of Stol Mountain (modified after [Leonov et al., 2008]).

(a) – general view of Stol Mountain; (б) – surface of Stol Mountain (photo by V.L. Leonov); (в) – western slope of Stol Mountain. Dashed lines – correlation of the rocks along the section (z), photo by V.L. Leonov; (z) – stratigraphic section of the rocks of Stol Mountain: 1 – massive olivine-containing basaltic lavas; 2 – ignimbrites; 3 – boulders, pebbles; 4 – ash tuff; 5 – megaplagioclase basalts; 6 – mainly aleurolites and sandstones; 7 – agglomerate and pephitic tuffs; 8 – tuffs with pebbles and boulders; 9 – fossil fauna (after [Shantser, 1974; Shantser, Kraevaya, 1980]; 10 – ignimbrite sample for Ar-Ar dating [Leonov et al., 2008]; (д) – ignimbrite outcrop, photo by A.N. Rogozin. Dotted line – boundary between the ignimbrites of the upper layer and conglomerates; (е) – exposed bed at the boundary between two layers of ignimbrites, which consists of conglomerate and ash tuff layers, photo by A.N. Rogozin.

Bindeman et al., 2010]. Игнимбриды горы Стол по своим палеомагнитным характеристикам схожи с игнимбридами верховьев рек Левая Жупанова, Правая Жупанова и обнажений береговых обрывов рек Карымской и Шумной (см. рис. 2, б), что свидетельствует о единых процессах формирования столь необычных игнимбридов в начальный период заложения ВВП на значительной территории [Shantser, Kraevaya, 1980].

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных работ было показано, что большая часть игнимбридовых извержений с базальт-андезитовым составом магм приурочены к субдукционным обстановкам. Возможными механизмами формирования кальдерообразующих извержений являются: (1) обогащение основных магм летучими компонентами; (2) особенности эволюции магм в коре (в том числе – длительное фракционирование, ассимиляция магмы и накопление летучих в верхних частях магматических камер); (3) наличие «внешней» воды, моря, озера, ла-

гуны и т.д. – наиболее важный, объединяющий признак всех изучаемых кальдер мира с базальт-андезитовым составом игнимбридов.

Основанием современного ВВП Камчатки являются мощные толщи базальт-андезитовых игнимбридов, залегающих на осадочных отложениях подводного континентального склона. Находки моллюсков, повышенный уровень моря и значительный подъем территории безусловно свидетельствуют о роли «внешней» воды в образовании столь необычных пирокластических пород ВВП Камчатки.

#### 5. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны наставнику и идейному вдохновителю изучения кальдерных комплексов Камчатки к.г.-м.н. В.Л. Леонову. Благодарим проф. И.Н. Биндемана за идею статистической обработки базы данных ГВП. О.В. Бергаль-Кувикас выражает признательность проф. Н.М. Шапиро за финансовую поддержку (мегагрант Минобрнауки России № 14.W03.31.0033). Работа выполнена по темам госзаданий ИВиС и ИГЕМ.

#### 6. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Abbot C.G., Fowle F.E., 1913. Volcanoes and climate. Smithsonian Miscellaneous Collections 60 (29), 1–24. Available from: [https://repository.si.edu/bitstream/handle/10088/23463/SMC\\_60\\_Abbot\\_1913\\_29\\_1-24.pdf](https://repository.si.edu/bitstream/handle/10088/23463/SMC_60_Abbot_1913_29_1-24.pdf).
- Aliskerov A.A., 1980. Mineralization of Shallow Magma Chamber (Avachinsko-Kethoiskaya uplift zone). Nauka, Moscow, 94 p. (in Russian) [Алискеров А.А. Оруденение малоглубинного магматизма (Авачинско-Кетхойская зона поднятий). М.: Наука, 1980. 94 с.].
- Avdeiko G.P., Bergal-Kuvikas O.V., 2015. The geodynamic conditions for the generation of adakites and Nb-rich basalts (NEAB) in Kamchatka. *Journal of Volcanology and Seismology* 9 (5), 295–306. <https://doi.org/10.1134/S0742046315050024>.
- Avdeiko G.P., Savelyev D.P., Popruzhenko S.V., Palueva A.A., 2003. Principle of uniformitarianism: criteria for paleotectonic reconstructions by the example of the Kurile-Kamchatka region. *Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences* (1), 32–60 (in Russian) [Авдейко Г.П., Савельев Д.П., Попрузженко С.В., Палуева А.А. Принцип актуализма: критерии для палеотектонических реконструкций на примере Курило-Камчатского региона // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2003. № 1. С. 32–60].
- Avdeiko G.P., Savelyev D.P., Palueva A.A., Popruzhenko S.V., 2007. Evolution of the Kurile-Kamchatkan volcanic arcs and dynamics of the Kamchatka-Aleutian Junction. In: J. Eichelberger, E. Gordeev, P. Izbekov, M. Kasahara, J. Lees (Eds.), *Volcanism and subduction: The Kamchatka Region. Geophysical Monograph Series*, vol. 172, p. 37–55. <https://doi.org/10.1029/172GM04>.
- Beaumont A., Bertrand H., Chazot G., Dosso L., Robin C., 2016. Temporal magma source changes at Gaua volcano, Vanuatu island arc. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 322, 30–47. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.02.026>.
- Bindeman I.N., 2006. Secret life of supervolcanoes. *Khimiya i Khimiki. V mire Nauki (Chemistry and chemists. In world of science)* (10), 66–86 (in Russian) [Биндеман И.Н. Тайная жизнь супервулканов // Химия и химики. В мире науки. 2006. № 10. С. 66–86].
- Bindeman I.N., Leonov V.L., Izbekov P.E., Ponomareva V.V., Watts K.E., Shipley N.K., Schmitt A.K., 2010. Large-volume silicic volcanism in Kamchatka: Ar–Ar and U–Pb ages, isotopic, and geochemical characteristics of major pre-Holocene caldera-forming eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 189 (1), 57–80. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.10.009>.
- Bindeman I.N., Simakin A.G., 2014. Rhyolites – Hard to produce, but easy to recycle and sequester: Integrating microgeochemical observations and numerical models. *Geosphere* 10 (5), 930–957. <https://doi.org/10.1130/GES00969.1>.
- Braitseva O.A., Melekestsev I.V., 1991. Eruptive history of Karymsky volcano, Kamchatka, USSR, based on tephra stratigraphy and <sup>14</sup>C dating. *Bulletin of Volcanology* 53 (3), 195–206. <https://doi.org/10.1007/BF00301230>.

- Cas R.A.F., Simmons J.M., 2018. Why deep-water eruptions are so different from subaerial eruptions. *Frontiers in Earth Science* 6, 198. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00198>.
- Cas R.A., Wright J.V., 1991. Subaqueous pyroclastic flows and ignimbrites: an assessment. *Bulletin of Volcanology* 53 (5), 357–380. <https://doi.org/10.1007/BF00280227>.
- Cashman K.V., Giordano G., 2014. Calderas and magma reservoirs. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 288, 28–45. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.09.007>.
- Chesner C., Rose W.I., Deino A.L., Drake R., Westgate J.A., 1991. Eruptive history of Earth's largest Quaternary caldera (Toba, Indonesia) clarified. *Geology* 19 (3), 200–203. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1991\)019<0200:EHOESL>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1991)019<0200:EHOESL>2.3.CO;2).
- De Rita D., Giordano G., Esposito A., Fabbri M., Rodani S., 2002. Large volume phreatomagmatic ignimbrites from the Colli Albani volcano (Middle Pleistocene, Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 118 (1), 77–98. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(02\)00251-2](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00251-2).
- Demonterova E.I., Ivanov A.V., Karmanov N.S., 2009. Basaltic ignimbrite-like rocks on Saikhan Volcano, northeastern Khangai, Mongolia: Mineralogic and geochemical evidence. *Journal of Volcanology and Seismology* 3 (4), 260–268. <https://doi.org/10.1134/S0742046309040034>.
- Druitt T.H., Sparks R.S.J., 1984. On the formation of calderas during ignimbrite eruptions. *Nature* 310 (5979), 679–681. <https://doi.org/10.1038/310679a0>.
- Egorov O.N., 2009. Structure formation and magma genesis under upper mantle plumes in volcanic belt between ocean-continent center of subaerial volcanism. IPE RAS, Moscow (in Russian) [Егоров О.Н. Структурообразование и магмогенез над верхнемантийными плюмами в вулканическом поясе зоны перехода океан – континент – центры эндогенной активности. М.: ИФЗ РАН, 2009]. Available from: <http://repo.kscnet.ru/id/eprint/2613>.
- Eichelberger J.C., Izbekov P.E., 2000. Eruption of andesite triggered by dyke injection: contrasting cases at Karymsky Volcano, Kamchatka and Mt Katmai, Alaska. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 358 (1770), 1465–1485. <https://doi.org/10.1098/rsta.2000.0599>.
- Fedorov P.I., Kovalenko D.V., Bayanova T.B., Serov P.A., 2008. Early Cenozoic magmatism in the continental margin of Kamchatka. *Petrology* 16 (3), 261–278. <https://doi.org/10.1134/S086959110803003X>.
- Fernández W.P., 2007. Basaltic Plinian and Violent Surtseyan Eruptions from the Masaya Caldera Complex, Nicaragua. Doctoral dissertation, Universitätsbibliothek Kiel. 194 p. Available from: [https://macau.uni-kiel.de/receive/dissertation\\_diss\\_00002063](https://macau.uni-kiel.de/receive/dissertation_diss_00002063).
- Freundt A., 2003. Entrance of hot pyroclastic flows into the sea: experimental observations. *Bulletin of Volcanology* 65 (2–3), 144–164. <https://doi.org/10.1007/s00445-002-0250-1>.
- Freundt A., Schmincke H.U., 1995. Eruption and emplacement of a basaltic welded ignimbrite during caldera formation on Gran Canaria. *Bulletin of Volcanology* 56 (8), 640–659. <https://doi.org/10.1007/BF00301468>.
- Geological Map of Russian Federation, 2000. Scale 1:200000. Southern Kamchatka Series. Lists N-57-XXVII, N-57-XXXIII. Explanatory Note. VSEGEI, Moscow, 302 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Серия Южно-Камчатская. Листы N-57-XXVII, N-57-XXXIII. Объяснительная записка. М.: ВСЕГЕИ, 2000. 302 с.].
- Gertisser R., Self S., Thomas L.E., Handley H.K., Van Calsteren P., Wolff J.A., 2011. Processes and timescales of magma genesis and differentiation leading to the great Tambora eruption in 1815. *Journal of Petrology* 53 (2), 271–297. <https://doi.org/10.1093/petrology/egr062>.
- Gladenkov A.Y., Gladenkov Y.B., 2004. Onset of connections between the Pacific and Arctic Oceans through the Bering Strait in the Neogene. *Stratigraphy and Geological Correlation* 12 (2), 175–187.
- Gladenkov Y.B., Sinekova V.N., Gladenkov U.B., 1990. Mollusks and climatic optimum during the Miocene on Kamchatka. Moscow, Nauka, 453 p. (in Russian) [Гладенков Ю.Б., Синельникова В.Н., Гладенков Ю.Б. Моллюски и климатические оптимумы миоцена Камчатки. М.: Наука, 1990. 453 с.].
- Gleckler P.J., Wigley T.M.L., Santer B.D., Gregory J.M., Achuta Rao K., Taylor K.E., 2006. Volcanoes and climate: Krakatoa's signature persists in the ocean. *Nature* 439 (7077), 675. <https://doi.org/10.1038/439675a>.
- Global Volcanism Program, 2017. Database of Smithsonian Institution. Washington. Available from: [http://volcano.si.edu/reports\\_weekly.cfm](http://volcano.si.edu/reports_weekly.cfm).
- Gudmundsson A., 2015. Collapse-driven large eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 304, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.07.033>.
- Gudmundsson A., 2016. The mechanics of large volcanic eruptions. *Earth-Science Reviews* 163, 72–93. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.10.003>.
- Gutmann J.T., 2002. Strombolian and effusive activity as precursors to phreatomagmatism: eruptive sequence at maars of the Pinacate volcanic field, Sonora, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 113 (1), 345–356. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(01\)00265-7](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(01)00265-7).
- Haq B.U., Hardenbol J., Vail P.R., 1987. The new chronostratigraphic basis of Cenozoic and Mesozoic sea level cycles. In: Special Publication, Cushman Foundation for Foraminiferal Research, vol. 24, p. 7–13.
- Hughes G.R., Mahood G.A., 2008. Tectonic controls on the nature of large silicic calderas in volcanic arcs. *Geology* 36 (8), 627–630. <https://doi.org/10.1130/G24796A.1>.

- Huppert H.E., Sparks R.S.J., 1988. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust. *Journal of Petrology* 29 (3), 599–624. <https://doi.org/10.1093/petrology/29.3.599>.
- Kuvikas O.V., 2008. Reconstruction of caldera forming eruption Pra-Karumsky volcano, Kamchatka (7800 BP). In: All-Russian conference for young sciences. Institute of the Earth's Crust, Irkutsk, p. 168–170 (in Russian) [Кувикас О.В. Реконструкция динамики кальдерообразующего извержения вулкана Пра-Карымский (7800 <sup>14</sup>C лет назад) // Материалы XXIII Всероссийской молодежной конференции. Иркутск: Институт земной коры, 2008. С. 168–170].
- Lander A.V., Shapiro M.N., 2007. The origin of the modern Kamchatka subduction zone. In: J. Eichelberger, E. Gordeev, P. Izbekov, M. Kasahara, J. Lees (Eds.), *Volcanism and subduction: the Kamchatka region*. Geophysical Monograph Series, vol. 172, p. 57–64. <https://doi.org/10.1029/172GM05>.
- Leonov V.L., Bindeman I.N., Rogozin A.N., 2008. New Ar-Ar dating of Kamchatkan ignimbrites. In: Materials of conference for Volcanologist day. Institute of Volcanology and Seismology of FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, p. 187–197 (in Russian) [Леонов В.Л., Биндеман И.Н., Рогозин А.Н. Новые данные по Ar-Ar датированию игнимбритов Камчатки // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога (27–29 марта 2008 г.). Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2008. С. 187–197]. Available from: [http://www.kscnet.ru/ivs/publication/volc\\_day/2008/art23.pdf](http://www.kscnet.ru/ivs/publication/volc_day/2008/art23.pdf).
- Leonov V.L., Bindeman I.N., Rogozin A.N., Kuvikas O.V., Kliapitsky E.S., 2011. Detection of new caldera on Kamchatka: boundary, age, caldera-forming deposits, unsolved problem. In: *Volcanism and related processes*. Materials of conference for Volcanologist day. Institute of Volcanology and Seismology of FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, p. 53–56 (in Russian) [Леонов В.Л., Рогозин А.Н., Биндеман И.Н., Кувикас О.В., Кляпицкий Е.С. Выделение новой кальдеры на Камчатке: границы, возраст, комплекс внутрикальдерных отложений, нерешенные вопросы // Вулканизм и связанные с ним процессы: Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2011. С. 53–56]. Available from: <http://repo.kscnet.ru/3007/1/Leonov%20et%20al.,%202011.pdf>.
- Leonov V.L., Grib E.N., 2004. Structural Positions and Volcanism of Quaternary Calderas of Kamchatka. *Dal'nauka, Vladivostok*, 189 p. (in Russian) [Леонов В.Л., Гриб Е.Н. Структурные позиции и вулканизм четвертичных кальдер Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 2004. 189 с.].
- Leonov V.L., Rogozin A.N., 2007. Karymshina, a giant supervolcano caldera in Kamchatka: Boundaries, structure, volume of pyroclastics. *Journal of Volcanology and Seismology* 1 (5), 296–309. <https://doi.org/10.1134/S0742046307050028>.
- Lind E.M., Wastegård S., 2011. Tephra horizons contemporary with short Early Holocene climate fluctuations: new results from the Faroe Islands. *Quaternary International* 246 (1–2), 157–167. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.05.014>.
- Lipman P.W., 1984. The roots of ash flow calderas in western North America: windows into the tops of granitic batholiths. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 89 (B10), 8801–8841. <https://doi.org/10.1029/JB089iB10p08801>.
- Lohmar S., Robin C., Gourgaud A., Clavero J., Angel Parada M., Moreno H., Ersoy O., Lopez-Escobar L., Naranjo J.A., 2007. Evidence of magma-water interaction during the 13,800 years BP explosive cycle of the Licán Ignimbrite, Villarrica volcano (Southern Chile). *Andean Geology* 34 (2), 233–248. <https://doi.org/10.5027/andgeoV34n2-a04>.
- Map of Modern Tectonics of USSR and Adjacent Area*, 1977. Scale 1:5000000. VSEGEI, Leningrad (in Russian) [Карта новейшей тектоники СССР и сопредельных областей. Масштаб: 1:5000000. Л.: ВСЕГЕИ, 1977].
- Map of Principal Trends in Paleotopography Development on the USSR Territory*, 1983. Scale 1:10000000. Paleomorphological Atlas (in Russian) [Карта палеогеографических характеристик СССР. Масштаб: 1:10000000. М., 1983].
- Martí J., Geyer A., Folch A., Gottsmann J., 2008. A review on collapse caldera modelling. In: J. Gottsmann, J. Martí (Eds.), *Caldera volcanism: analysis, modelling and response*. Developments in volcanology, vol. 10, p. 233–283. [https://doi.org/10.1016/S1871-644X\(07\)00006-X](https://doi.org/10.1016/S1871-644X(07)00006-X).
- Melekestsev I.V., 1974. Main stages of formation modern relief of Kurile-Kamchatka region. In: O.M. Adamenko, S.A. Arkhipov, I.V. Luchitskiy, V.A. Nikolayev, N.A. Florensov, G.I. Khudyakov (Eds.), *The history of the relief development of Siberia and the Far East. Kamchatka, Kurile and Komandor islands*. Nauka, Moscow, p. 337–345 (in Russian) [Мелекестев И.В. Основные этапы формирования современного рельефа Курило-Камчатской области // История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. Камчатка, Курильские и Командорские острова / Ред. О.М. Адаменко, С.А. Архипов, И.В. Луцицкий, В.А. Николаев, Н.А. Флоренсов, Г.И. Худяков. М.: Наука, 1974. С. 337–345].
- Miller C.F., Wark D.A., 2008. Supervolcanoes and their explosive supereruptions. *Elements* 4 (1), 11–15. <https://doi.org/10.2113/GSELEMENTS.4.1.11>.
- Oppenheimer C., 2003. Climatic, environmental and human consequences of the largest known historic eruption: Tambora volcano (Indonesia) 1815. *Progress in Physical Geography* 27 (27), 230–259. <https://doi.org/10.1191/0309133303pp379ra>.
- Rachmat H., Rosana M.F., Wirakusumah A.D., Jabbar G.A., 2016. Petrogenesis of Rinjani Post-1257-Caldera-Forming-Eruption Lava Flows. *Indonesian Journal on Geoscience* 3 (2), 107–126. <https://doi.org/10.17014/ijog.3.2.107-126>.
- Robin C., Eissen J.P., Monzier M., 1993. Giant tuff cone and 12-km-wide associated caldera at Ambrym Volcano (Vanuatu, New Hebrides Arc). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 55 (3–4), 225–238. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(93\)90039-T](https://doi.org/10.1016/0377-0273(93)90039-T).
- Robin C., Eissen J.P., Monzier M., 1994. Ignimbrites of basaltic andesite and andesite compositions from Tanna, New Hebrides Arc. *Bulletin of Volcanology* 56 (1), 10–22. <https://doi.org/10.1007/BF00279725>.

- Robin C., Eissen J.P., Monzier M., 1995. Mafic pyroclastic flows at Santa Maria (Gaua) volcano, Vanuatu: the caldera formation problem in mainly mafic island arc volcanoes. *Terra Nova* 7 (4), 436–443. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.1995.tb00539.x>.
- Rogozin A.N., Leonov V.L., Kuvikas O.V., 2011. Unusual ignimbrites of Verhneavachinskaya caldera (Kamchatka): stratigraphy columns and geochemical characteristics. In: *Volcanism and geodynamic. Materials of V All-Russian symposium of volcanology and paleovolcanology*. Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg, p. 234–237 (in Russian) [Рогозин А.Н., Леонов В.Л., Кувикас О.В. Необычные игнимбриты Верхнеавачинской кальдеры (Камчатка): строение разрезов и петрохимические особенности // Вулканизм и геодинамика: Материалы V Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2011. С. 234–237].
- Schmidt R., van den Bogaard C., Merkt J., Müller J., 2002. A new Lateglacial chronostratigraphic tephra marker for the south-eastern Alps: The Neapolitan Yellow Tuff (NYT) in Längsee (Austria) in the context of a regional biostratigraphy and palaeoclimate. *Quaternary International* 88 (1), 45–56. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(01\)00072-6](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(01)00072-6).
- Shanster A.E., 1974. Stage of paleo relief on Kamchatka. In: O.M. Adamenko, S.A. Arkhipov, I.V. Luchitskiy, V.A. Nikolaev, N.A. Florensov, G.I. Khudyakov (Eds.), *The history of the relief development of Siberia and the Far East. Kamchatka, Kurile and Komandor islands*. Nauka, Moscow, p. 58–82 (in Russian) [Шанцер А.Е. Этапы развития палеорельефа // История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. Камчатка, Курильские и Командорские острова / Ред. О.М. Адаменко, С.А. Архипов, И.В. Луцицкий, В.А. Николаев, Н.А. Флоренсов, Г.И. Худяков. М.: Наука, 1974. С. 58–82].
- Shantser A.E., Kraevaya T.S., 1980. Formation Series of the Terrestrial Volcanic Belt (the Late Cenozoic of Kamchatka as an Example). Nauka, Moscow, 164 p. (in Russian) [Шанцер А.Е., Краевая Т.С. Формационные ряды наземного вулканического пояса: на примере позднего кайнозоя Камчатки. М.: Наука, 1980. 164 с.].
- Sheth H.C., Ray J.S., Bhutani R., Kumar A., Smitha R.S., 2009. Volcanology and eruptive styles of Barren Island: an active mafic stratovolcano in the Andaman Sea, NE Indian Ocean. *Bulletin of Volcanology* 71 (9), 1021–1039. <https://doi.org/10.1007/s00445-009-0280-z>.
- Simkin T., Fiske R.S., 1983. Krakatau 1883. *Earthquake Information Bulletin (USGS)* 15 (4), 128–133.
- Sparks R.S.J., Sigurdsson H., Wilson L., 1977. Magma mixing: a mechanism for triggering acid explosive eruptions. *Nature* 267 (5609), 315–318. <https://doi.org/10.1038/267315a0>.
- Stern R.J., 1979. On the origin of andesite in the northern Mariana island arc: Implications from Agrigan. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 68 (2), 207–219. <https://doi.org/10.1007/BF00371901>.
- Stern R.J., 2002. Subduction zones. *Reviews of Geophysics* 40 (4), 1012. <https://doi.org/10.1029/2001RG000108>.
- Walker G.P., 1988. Three Hawaiian calderas: an origin through loading by shallow intrusions? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 93 (B12), 14773–14784. <https://doi.org/10.1029/JB093iB12p14773>.
- Walker J.A., Williams S.N., Kalamarides R.L., Feigenson M.D., 1993. Shallow open-system evolution of basaltic magma beneath a subduction zone volcano: the Masaya Caldera Complex, Nicaragua. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 56 (4), 379–400. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(93\)90004-B](https://doi.org/10.1016/0377-0273(93)90004-B).
- Williams H., 1941. Calderas and their origin. *Bulletin of the Department of Geology of the University of California* 25 (6), 239–346.
- Witter J.B., Self S., 2007. The Kuwae (Vanuatu) eruption of AD 1452: potential magnitude and volatile release. *Bulletin of Volcanology* 69 (3), 301–318. <https://doi.org/10.1007/s00445-006-0075-4>.
- Zavaritsky A.N., 1955. *Volcanoes of Kamchatka*. USSR Academy of Sciences Publishing House, Moscow, 512 p. (in Russian) [Заварицкий А.Н. Вулканы Камчатки. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 512 с.].

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Ольга Валерьевна Бергаль-Кувикас**

PhD, с.н.с.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН  
683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9, РоссияИнститут геологии рудных месторождений, петрографии,  
минералогии и геохимии РАН  
119017, Москва, Старомонетный пер., 35, строение 2, Россия✉ e-mail: [kuvikas@mail.ru](mailto:kuvikas@mail.ru)ID <https://orcid.org/0000-0003-0079-507X>**Olga V. Bergal-Kuvikas**

PhD, Senior Researcher


Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch of RAS  
9 Piip Boulevard, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, RussiaInstitute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy,  
and Geochemistry of RAS  
35 Staromonetnyi per., building 2, Moscow 109017, Russia

**Алексей Николаевич Рогозин**

н.с.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН  
683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9, Россия

e-mail: [alekseiras@yandex.ru](mailto:alekseiras@yandex.ru)

 <https://orcid.org/0000-0001-5736-1489>

**Aleksei N. Rogozin**

Researcher


Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch of RAS  
9 Piip Boulevard, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia

**Евгений Сергеевич Кляпицкий**

м.н.с.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН  
683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9, Россия

e-mail: [Kliapich@gmail.com](mailto:Kliapich@gmail.com)

 <https://orcid.org/0000-0003-1727-5695>

**Evgenii S. Klyapitsky**

Junior Researcher

Institute of Volcanology and Seismology, Far East Branch of RAS  
9 Piip Boulevard, Petropavlovsk-Kamchatsky 683006, Russia