

УДК 550.34:551.44:552.323:553.81

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ АКАДЕМИЧЕСКОЙ НАУКИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ВУЛКАНОВ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА КАМЧАТКЕ

© 2022 г. Е. И. Гордеев^а, *, Г. А. Карпов^а, **

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

*e-mail: gordeev@kscnet.ru

**e-mail: karpovga@kscnet.ru

Поступила в редакцию 14.12.2021 г.

После доработки 25.02.2022 г.

Принята к публикации 08.04.2022 г.

В статье сделан обзор результатов научных исследований коллектива Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН за период 1962–2021 гг., имеющих фундаментальное значение. Рассмотрены важнейшие достижения по разделам: *Вулканологические исследования* – петролого-геохимические особенности продуктов извержений вулканов Курило-Камчатского региона; возраст вулканов и этапы вулканогенного катастрофизма на Камчатке; гидротермальные системы и геотермальные ресурсы Камчатки; гидротермальный метасоматоз и вулканогенное минерало-рудообразование. *Геофизические исследования* – сейсмология вулканов; деформационные процессы на активных вулканах; тектонические землетрясения и цунами; внутреннее строение вулканических систем.

Ключевые слова: Камчатка, вулкан, извержение, сейсмичность, цунами, магматические очаги, геотермальные ресурсы, петрогенезис, минералогия, геохимия, алмазы, изотопия

DOI: 10.31857/S0203030622040046

ВВЕДЕНИЕ

Организация и развитие отечественной вулканологии неразрывно связаны с именами выдающихся исследователей: академика *А.Н. Заварицкого* – организатора и первого директора Лаборатории вулканологии в Москве, возглавившего в 1931 г. первую экспедицию на Камчатку для изучения действующего вулкана Авача; академика *Ф.Ю. Левинсон-Лессинга* – организатора и первого директора Камчатской вулканологической станции на Камчатке; члена-корреспондента АН СССР *Б.И. Пийпа* – первого директора Института вулканологии в г. Петропавловск-Камчатский, а также с именами последующих директоров этого института – члена-корреспондента АН СССР *Г.С. Горшкова* и академика *С.А. Федотова*.

Институт вулканологии СО АН СССР на Камчатке был создан в соответствии с Постановлением Президиума Академии наук СССР от 7 сентября 1962 г. С самого начала своей деятельности он был призван не только возглавить все работы в области вулканологии на территории СССР, но и принимать участие в изучении процессов вулканизма на территориях зарубежных стран. И уже вскоре после создания Институт вулканологии стал флагманом отечественной вулканологической науки и признанным авторитетом среди вулканологов Мира.

Книги первого директора Института вулканологии члена-корреспондента АН СССР *Б.И. Пийпа* [1937, 1956] были первыми, наиболее полными сводками данных по гидротермальным системам Камчатки и петролого-минералогическим свойствам изверженных пород самого высокого действующего вулкана Евразии – Ключевская сопка. Они не утратили своей актуальности и являются настольными пособиями специалистов до сих пор.

Второй директор Института член-корреспондент АН СССР *Г.С. Горшков*, организовавший комплексные исследования уникального извержения вулкана Безымянный в 1956 г., обогатил науку новым термином – “направленный взрыв” [Горшков, Богоявленская, 1965; Горшков, Дубик, 1969]. Это открытие быстро стало использоваться вулканологами всего Мира. Кроме того, *Г.С. Горшков* обнаружил явление экранирования жидкой магмой объемных сейсмических волн далеких землетрясений и впервые в мировой практике определил глубину магматического очага под Ключевской группой вулканов (60–80 км).

Многие результаты научных исследований сотрудников Института вулканологии (в период 1962–2003 гг.) и Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (в настоящее время) на действующих вулканах и гидротермальных системах

Курило-Камчатского региона и многих вулканах Мира легли в золотой фонд наук о Земле.

Рассмотрим наиболее выдающиеся результаты исследований камчатских вулканологов по ряду научных проблем.

ВУЛКАНИЗМ И СВЯЗАННЫЕ С НИМ ПРОЦЕССЫ

Вулканизм как глобальное явление природы

К числу фундаментальных результатов научных исследований Института вулканологии первых лет существования, безусловно, следует отнести монографию И.И. Гущенко [1979]. В ней были сведения о 933 действующих вулканах Мира, кратко описаны практически все исторические извержения вулканов, начиная с 1500 г. до нашей эры. Было показано, что только в XX в. в Мире произошло 1044 извержений 320 вулканов. Оказалось, что максимальное количество извержений пришлось на 1951 г. На примере Курило-Камчатского региона было показано, что только 7% изверженного пеплового материала участвует в формировании осадков в районе аппаратов вулканов, 43% остается на суше, а 50% уносится в акватории Тихого океана и Охотского моря.

В Институте вулканологии были разработаны основы фундаментальной теории формирования геосфер Земли за счет продуктов вулканизма [Мархинин, 1967]. По расчетам Е.К. Мархинина на Камчатке и Курильских островах находится 8.3% действующих вулканов Земли (без учета подводных вулканов океанов). В среднем, в год здесь извергается на поверхность порядка 0.4 млрд т магматического вещества. Современная вулканическая деятельность наиболее активно проявляется на островных дугах и родственных им структурах, где ежегодно извергается порядка 6 млрд т вещества.

Таким образом, Е.К. Мархинин подсчитал, что “даже если вулканические явления в прошлом были только на уровне современных, то и тогда за время существования земной коры вулканами должно было быть вынесено из глубин от 13.5×10^{18} до 27×10^{18} т вещества, что практически равно массе всей континентальной и субконтинентальной земной коры” [Ронов, Ярошевский, 1976]. Вывод практически однозначный — земная кора формировалась и продолжает формироваться за счет продуктов вулканизма, поступающих из глубин Земли в круговорот геологических процессов на ее поверхности. Кроме того, обнаружение в еще горячем пирокластическом материале (по Е.К. Мархинину — в “ювенильном пепле”) извержений, сначала вулканов Тятя на Кунашире и Толбачике (Большое трещинное Толбачинское извержение 1975–1976 гг.) на Камчатке, а затем еще на пяти действующих вулканах Тихоокеан-

ского огненного кольца сложных органических соединений (пятнадцати аминокислот, углеводов — глюкозы и арабинозы, порфиринов и многочисленных углеводородов — от $C_{15}H_{32}$ до $C_{36}H_{74}$ — позволило сделать новаторское предположение об абиогенном образовании органических веществ, которые можно считать предбиологическими структурами [Мархинин, Подклетнов, 1977]. По расчетам Е.К. Мархинина количество абиогенных углеводородов и гетероатомных структур, найденных в пеплах вулканов Тятя, Алаид и Толбачик, составляет многие сотни тонн за одно извержение.

Суммируя все вышеперечисленные результаты исследований, Е.К. Мархинин выдвинул смелую гипотезу: “Хотя пути возникновения органических соединений во Вселенной разнообразны, на Земле только их вулканический синтез мог положить начало химической эволюции, приведшей к возникновению жизни” [Мархинин, 1980]. Эта научная концепция (биовулканология) со временем находит достаточно убедительное подтверждение.

Наиболее интересные результаты по наблюдениям вулканической активности были получены для вулкана Безымянный, на котором детально исследована динамика роста лавового купола в кратере, который образовался в результате катастрофического взрыва в 1956 г. Длительные инструментальные фотограмметрические дистанционные наблюдения позволили изучить подробности возрождения вулкана. Впервые в истории дистанционных наблюдений, уникальный набор фотограмметрических данных позволил реконструировать поверхностные изменения, связанные с почти 70-летним периодом восстановления постройки вулкана Безымянный после обрушения. С помощью цифровых моделей рельефа высокого разрешения была определена морфологическая и структурная эволюция роста постройки, а также установлено, что вулканическая активность постепенно менялась от деструктивных к конструктивным процессам, что в конечном итоге привело к переходу от лавового купола к стратоконусу с централизованным жерлом [Shevchenko et al., 2020].

ПЕТРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОДУКТОВ ИЗВЕРЖЕНИЙ ВУЛКАНОВ КАМЧАТСКО-КУРИЛЬСКОГО РЕГИОНА

Теория петрогенезиса

Петролого-геохимические статьи О.Н. Волынца, В.А. Ермакова, А.В. Колоскова, Г.Б. Флорова, С.А. Хубуная и других ученых Института продолжили пионерные работы по петрохимии В.И. Влодавца, Б.И. Пийпа, Г.С. Горшкова, которые легли в основу фундаментальных достиже-

ний академической науки по теории петрогенеза [Волынец, 1993; Волынец и др., 1976, 1978]. Первой крупной обобщающей работой по этой теме была монография В.А. Ермакова “Формационное расчленение четвертичных вулканических пород Ключевской группы вулканов Камчатки” [Ермаков, 1977]. В этой статье была впервые опубликована геологическая карта Ключевской группы вулканов и сделан синтез практически всех имеющихся данных по хронологии, истории геологического развития, петрологии, химизму лав и составу включений в вулканических породах района исследований. В сборнике [Включения ..., 1978] было убедительно аргументировано участие вещества земной коры в формировании андезитовых магм.

Детальные петрографические, минералогические и геохимические исследования среднекалийевых базальтоидов вулкана Ключевской и субщелочных высококалийевых трахиандезибазальтов вулкана Плоский Толбачик извержения 2012–2013 гг. позволили камчатским вулканологам объяснить феномен нарушения геохимической зональности в этом районе Камчатки. Продукты вулканической деятельности обоих вулканов имеют явные признаки двухэтапной фракционной кристаллизации родоначального расплава в двух магматических камерах: глубинной магнезиальной и малоглубинной высокоглиноземистой [Хубуная и др., 2018]. Радиогенные изотопные отношения Sr, Nd и Pb в сравниваемых типах пород свидетельствуют о мантийном генезисе и отсутствии влияния вещества земной коры на их составы. Распределение элементов на спайдер-диаграммах показало, что при повышенных содержаниях всех некогерентных элементов, К-трахиандезибазальты характеризуются типичными островодужными характеристиками: положительными максимумами крупноионных элементов – Ba, U, Pb и отрицательными минимумами высокочарядных элементов – Th, Nb, Ti. Геохимические особенности К-трахиандезибазальтов и среднекалийевых базальтоидов связаны с плавлением единого мантийного источника, имеющего более высокую степень генерации родоначальных расплавов у К-трахиандезибазальтов [Хубуная и др., 2016]. Геофизические исследования под вулканами Ключевской и Плоский Толбачик позволили предполагать глубину генерации родоначальных расплавов среднекалийевых базальтов – 45–60 км, субщелочных К-трахиандезибазальтов – до 100 км [Гонтовая и др., 2010]. Эти представления, безусловно, являются важными для петрологов.

Самостоятельную значимость для развития теории формирования вулканических расплавов разного состава имеют работы О.Н. Волынца и А.В. Колоскова по детальному описанию ксеноли-

тов, часто встречающихся в лавах вулканов Курило-Камчатской островной дуги [Включения ..., 1978].

Научная проблема, в исследованиях которой камчатские вулканологи также имеют явный приоритет – это установление большой роли процесса рифтогенеза в развитии новейшей тектонической структуры вулканических поясов Камчатки [Ермаков и др., 1974]. На большом фактическом материале впервые было показано, что типоморфным рифтом (с соответствующим составом и типом вулканизма) на Камчатке является структура Центральной Камчатской депрессии. Были найдены такие петрологические признаки рифтогенеза, как наличие щелочных пород, хорошо согласующихся с зонами растяжения, установленными методом сейсмической томографии. В настоящее время – это общепризнанные факты. Рифтогенные признаки обнаружены не только в новейшей структуре Камчатки, но и в ее кайнозойских и меловых структурах.

Изучение химического состава и условий формирования магматических пород при извержениях вулканов всегда сопряжено с исследованиями фумарольных газов. Значительное место занимают парогазовые эманации и в составе современных гидротермальных систем. Работы камчатских ученых [Меняйлов и др., 1980; Таран, 1988] внесли значимый вклад в копилку сведений о составе вулканических газов. Комплексные исследования геохимии вулканических газов позволили Ю.А. Тарану установить строгую линейную корреляцию между содержанием хлора и изотопными отношениями дейтерия в составе газовых флюидов островодужных вулканов, что позволило обосновать гипотезу о рециклинге морской воды в зонах субдукции [Таран, 1988].

*Петролого-геохимическая модель эволюции
и механизма извержений магматического вещества
Ключевского вулкана*

Для объяснения механизмов, динамики и закономерностей периодичности эруптивного процесса сотрудниками Института в начале XX в. было осуществлено лабораторное моделирование течения двухфазных смесей в вертикальных каналах. В результате была создана петролого-геохимическая модель эволюции единой известково-щелочной серии расплавов Ключевского вулкана – от высокомагнезиальных до высокоглиноземистых магм. Установлено, что образование всей серии пород происходит в условиях декомпрессионного фракционирования оливин-пироксеновой минеральной ассоциации. Был выявлен новый тип динамики извержения, т.н. периодическое фонтанирование, обусловленное экспериментально

подтвержденным кластерным режимом течения двухфазных смесей [Озеров, 2019].

Возраст вулканов и этапы вулканогенного катастрофизма на Камчатке

Безусловно, к важнейшим достижениям камчатских вулканологов относится разработка ими метода тефрохронологического определения возраста действующих вулканов и установление сильнейшего в нашей эре этапа природного катастрофизма на Камчатке. Эти исследования позволили внести существенный вклад в мировую летопись эксплозивного вулканизма и установить наличие планетарных периодов активизации эксплозивного вулканизма в конце плейстоцена—начале голоцена [Мелекесцев и др., 1990].

Особенное значение, как в плане проблемы региональной геологии, так и для документации природных событий, катастрофически повлиявших на окружающую среду, имеют разработки и выводы сотрудников Института о имевших место на Камчатке сильнейших и катастрофических извержениях вулканов, нередко сопровождавшихся мощными землетрясениями. По данным геологических и геоморфно-вулканологических исследований самый мощный и продолжительный этап вулканогенного катастрофизма за последние 2000 лет приходится на Камчатку на период 0—650 лет н. э. [Базанова и др., 2016]. Отмечено также, что начало новой эры в масштабе всего земного шара отличалось высокой концентрацией катастрофических событий и явлений. В этот период происходили мощнейшие извержения многих вулканов с объемом вынесенных пород 10 и более кубических километров. Причем, начало новой эры характеризовалось и значительной интенсивностью сейсмической активности и цунамигенностью. В течение первых 650 лет новой эры на Камчатке было извержено 8—10 км³ ювенильных продуктов андезитового состава общим весом порядка 15 млрд т. В этот период средняя продуктивность вулканов составляла 25 млн т в год. Отличительной чертой вулканической деятельности периода 0—650 лет н. э. явилось также разнообразие состава изверженных продуктов — от риолитов до базальтов, при необычайно высокой (до 30%) доле кислого материала. Катастрофические пеплопады оказали мощное воздействие на окружающую среду и рельефообразование. Обнаружение в истории вулканизма Земли сравнительно молодого периода вулканогенного катастрофизма безусловно следует рассматривать как выдающееся научное достижение на уровне открытия.

ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ КАМЧАТКИ

Вынос тепла гидротермальными системами и магматическими очагами

Аномально высокий вынос тепла и вещества из недр в виде горячих источников и гейзеров в областях активного вулканизма еще в начале XX в. вызвал интерес специалистов по геотермии с позиций их использования в энергетике. Научные исследования камчатских вулканологов внесли достойную лепту и в эту проблематику. Развивая учение о высокотемпературных теплоносителях, В.В. Аверьев [1961] создал теорию теплового питания гидротермальных систем, высказал новые представления о природе кислого вулканизма и разработал методы оценки энергетических ресурсов месторождений подземного тепла.

Крупным обобщением материалов по разведке и эксплуатации 52 высокотемпературных геотермальных месторождений Мира является коллективная монография [Кирюхин и др., 2010]. Помимо достаточно общих гидрогеологических характеристик вулканогенных бассейнов континентов, областей перехода “суша—океан”, а также вулканогенных бассейнов России и сопредельных стран, авторы детально описали особенности всех известных к настоящему времени вулканогенных бассейнов Камчатки. В монографии представлены новые концептуальные модели крупнейшего Мутновского месторождения парогидротерм и Паужетского гидротермального месторождения, их эксплуатационные запасы. Уточнены геотермальные ресурсы Камчатки и обозначены ближайшие перспективы их освоения [Кирюхин, Сугробов, 2019]. В работе показано, что прогнозных ресурсов самого экологически чистого источника энергии — геотермального тепла достаточно для выработки 3900 МВт электрической энергии. Ресурсы для теплообеспечения г. Петропавловска-Камчатского оценены в 1350 МВт (тепловых).

Несомненны успехи ученых Института вулканологии и в исследованиях по новой проблеме — “использование тепла, аккумулированного магматическими очагами”. Эта проблема еще плохо изучена, но, несомненно, будет разрабатываться в ближайшее время. Тепло неглубоко расположенных магматических очагов рассматривается как потенциальный геотермальный ресурс. В работах [Сугробов, 1982; Федотов и др., 2007] уже сделаны оценки количества тепла в магматических очагах Авачинского вулкана. Предполагается, что неглубоко залегающие магматические очаги имеют вулканы Кошелевский, Ходутка, Опала, Ипелька, Горелый, Мутновский, Дзедзур, Кизимен. По оценкам специалистов Института вулканологии минимальная величина ресурсов тепла малолу-

бинных магматических очагов Камчатки равна 10^{21} Дж [Кириухин и др., 2017].

В продолжение рассматриваемой тематики, в монографии [Кириухин, 2020] обобщены материалы исследований по закономерностям условий формирования вулканогенных гидротермальных систем и функционирования вулканов. Показано, что 1) активные вулканы могут работать в качестве инжекторов не только магмы, но и CO_2 и воды в прилегающие структуры, при этом формируются высокотемпературные продуктивные геотермальные резервуары; 2) сейсмические данные отражают характеристики магматического фринга и геомеханического состояния под активными вулканами; 3) сейсмогенные разломы на шельфе Камчатки являются индикаторами генерации магматогенных флюидов и воды до глубин 150 км; 4) гейзеры являются результатом газлифта в областях кислого вулканизма и мониторинг концентрации магматогенного CO_2 в гидротермальных системах — ключ к пониманию взаимосвязи вулканической и гидротермальной активности.

Длительноживущие гидротермально-магматические рудогенерирующие системы

С 2001 г. под научным руководством С.Н. Рычагова в Институте разрабатывается новое научное направление — “Эволюция длительноживущих гидротермально-магматических систем областей современного и древнего вулканизма”. Получены фундаментальные результаты. Определено, что гидротермально-магматические системы островных дуг не только контролируют тепломассопоток в зоне перехода “океан—континент”, но могут и генерировать энергию и вещество. На основании обобщения геофизических данных, изотопных исследований и изучения материалов сверхглубокого бурения было установлено, что корни этих структур находятся в основании земной коры. Непосредственным источником тепла и рудных компонентов служат остывающие субвулканические тела габбро-диоритов-гранитов, а также экзотермические реакции в системе “газ—вода—порода”. В недрах таких систем формируются геотермальные мезо-эпитермальные Au—Pb—Cu—Zn-редкометалльные рудопоявления и происходит зарождение минерализации Au—Ag—Cu—Mo-порфирирового типа [Рычагов, 2003]. На современном этапе развития этих рудогенерирующих структур образуются газо-гидротермальные системы, вмещающие крупнейшие в мире пародоминирующие геотермальные месторождения — Гейзерс (США), Лардерелло (Италия), Камоджанг (Индонезия), Кошелеевское (Россия, Камчатка) и др. [Рычагов, 2014].

ГИДРОТЕРМАЛЬНЫЙ МЕТАСОМАТОЗ И ВУЛКАНОГЕННОЕ МИНЕРАЛО-РУДООБРАЗОВАНИЕ

Гидротермальный метасоматоз

Исследования гидротермальных процессов на термальных полях современных гидротермальных систем и керн скважин при разбуривании месторождений парогидротерм на Камчатке и Курилах позволили сделать важные открытия по проблеме условий современного минерало-рудогенеза в вулканических областях.

В работе [Набоко, 1963] впервые, на примерах разбуренных гидротермальных систем Камчатки, были описаны все этапы формирования гидротермальных изменений пород в месторождениях гидротерм областей активного вулканизма на глубинах до 1 км — от исходной, неизменной, до полностью метаморфизованной, часто утратившей свой первоначальный облик, состав и структуру. В развитие этих материалов, на базе комплексных минералого-петрографических исследований, включающих и эксперименты по взаимодействию в системе “раствор—порода” непосредственно в геотермальных скважинах [Карпов, 1976], были обнаружены и описаны типоморфные фации метасоматитов в материале кернов скважин на Паужетском [Паужетское ..., 1965], Больше-Банном [Трухин, Петрова, 1965; Карпов, 1976], Мутновском [Словцов, 1994] и на Узонском термальном поле [Карпов, 1988]. Была установлена типоморфная метасоматическая формация современных высокотемпературных гидротермальных систем. Эта формация характеризуется развитием пропилит-аргиллизитовой ассоциации вторичных минералов, включающей следующие основные фации (сверху вниз) — опал-каолинитовую с алунином, лимонитом ($T = 50\text{--}100^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 1.25\text{--}4.5$), монтмориллонит-цеолитовую, с пиритом ($T = 100\text{--}190^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 4\text{--}5.5\text{--}6.5$), кварц-адуляровую ($T = 125\text{--}160^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 6.5\text{--}6.6$), альбит-адуляровую ($T = 160\text{--}180^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 6.6\text{--}9.0$), вайрацит-пренитовую ($T = 180\text{--}240^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 6.0\text{--}7.2\text{--}9.0$), кварц-эпидот-хлоритовую, или пропилитовую ($T = 200\text{--}350^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 6.0\text{--}9.0$), с эпидотом, пренином, актинолитом, хлоритом, альбитом, гидрогранатом, кальцитом, кварцем и пиритом [Вергасова и др., 2017]. Многочисленные исследования кернов скважин, пробуренных на современных гидротермальных системах мира, показали аналогичные парагенезисы вторичных и трещинных минералов.

Новые минералы, открытые на fumarольных и термальных полях Камчатки

В результате комплексных минералого-геохимических и кристаллографических исследований, на fumarольных полях действующих вулка-

нов и на термальных полях современных гидротермальных систем Камчатки сотрудниками Института Л.П. Вергасовой, С.Ф. Главатских, Е.К. Серафимовой, Г.А. Карповым и др. в тесном сотрудничестве с учеными кафедры кристаллографии Санкт-Петербургского университета (СПбГУ), открыто и утверждено Комиссией по новым минералам около 50 новых минералов меди, цинка, свинца, ванадия, таллия и других элементов, а также самородных — углерода (алмаз, графит), серы, золота, железа, алюминия, меди, цинка, кремния, вольфрама, висмута, селена, мышьяка, интерметаллических соединений, а также карбидов, сульфидов, фторидов, хлоридов и оксохлоридов, оксидов и гидроксидов, карбонатов, сульфатов и оксосульфатов, арсенатов, ванадатов, силикатов, селенитов и оксоселенитов и теллурат меди [Вергасова и др., 2017].

Были установлены минералы с неизвестной ранее кристаллохимией. Расшифровка их кристаллических структур, проведенная на кафедре кристаллографии СПбГУ под руководством профессоров С.В. Кривовичева и С.К. Филатова позволила выявить характерную черту этих минералов — наличие прочных катионных тетраэдров, например, медных $[\text{OCu}_4]^{6+}$, противоположных по знаку заряда хорошо известным анионным тетраэдрам $[\text{SiO}_4]^{4-}$ [Филатов и др., 2015]. Это, безусловно, открытие мирового уровня.

Благородно-метальное оруденение в вулканогенных комплексах Камчатки

Разработкой фундаментальных проблем геологии и генезиса вулканогенных, главным образом, благороднометальных близповерхностных месторождений зоны перехода “континент—океан” занимается Лаборатория вулканогенного рудообразования ИВиС ДВО РАН, которую возглавлял кандидат геол.-мин. наук В.М. Округин. На базе комплексных исследований около 10 эпитеpmальных месторождений Камчатки впервые были детально охарактеризованы типоморфные особенности рудных минералов — самородного золота, сульфидов и сульфосолей, оценены физико-химические параметры промышленного рудообразования, определен молодой (от 1.1 до 0.5–0.3 млн лет) возраст рудных зон, сопоставимый с такими уникальными месторождениями Японии, как Хишихари и Тойоха. В камчатских месторождениях диагностированы около 150 рудных минералов, большое количество самородных элементов и практически все известные в природе минералы золота и серебра. В рудах молодого Мутновского месторождения был обнаружен индийсодержащий сфалерит с концентрацией индия от 3.08 до 11.08%. Открыты два новых минера-

ла — наталиямаликит и новограбленовит [Okrugin et al., 2017, 2019].

Минерально-фазовый, углеродсодержащий парагенезис эруптивного вулканизма базальтового состава

В пирокластических продуктах современного вулканизма Камчатки (на вулканах Толбачик, Ключевской, Корякский) выявлен и детально изучен неизвестный ранее углеродный минерально-фазовый парагенезис, включающий алмаз, графит, шунгитоподобные битумы, глобулы диуглеродного состава, металло-углеродные наномикрокомпозицы, многочисленные самородные элементы и их сплавы, а также абиогенные органические соединения. Минеральная ассоциация, сопутствующая этому парагенезису насчитывает более 100 минералов и фаз, среди которых выявлено 38 самородных металлов и их сплавов, 4 редких карбида, 16 оксидов, 15 халькогенидов, 9 силикатов и алюмосиликатов, 7 галогенидов, 8 кислородных солей, а также редкий нитрид титана — осборнит и, по-видимому, новый минерал — бромид таллия. Открытый новый генетический тип природного внемантийного алмазообразования, генетически связанный с современным базальтоидным вулканизмом, по ряду характерных признаков имеет существенные отличия от ранее известных типов алмазообразования. По среде и месту открытия он получил название “вулканогенно-эруптивный” или “толбачинский” [Гордеев и др., 2014; Карпов и др., 2014].

Авторы открытия квалифицировали описанный парагенезис как *эксплозивно-атмоэлектрогенный*. Средой такого минерало-фазообразования служит эруптивное пепло-газовое облако, являющееся своеобразным природным химическим реактором, в котором система “газ—пепел” находится в псевдосжиженном состоянии.

Толбачинские алмазы характеризуются аномально высоким содержанием лантаноидов. По этому признаку они на порядок превосходят кимберлитовые алмазы. Аномально высоки в них также содержания Co, Ni, Mn, Fe. В толбачинских алмазах присутствуют наноразмерные включения Mn-Ni сплавов [Галимов и др., 2016; Карпов и др., 2017; Силаев и др., 2019a]. Исходя из результатов изотопных анализов, авторы пришли к выводу о том, что выявленный углеродный парагенезис имел единый углеводородно-газовый глубинный источник углерода. Таким образом, кроме открытия нового типа алмазообразования, получены данные о существовании в природе глобального процесса эндогенной углеродизации земной коры в ходе корово-мантийных взаимодействий в зонах субдукции [Силаев и др., 2019б; Galimov et al., 2020].

Исследования толбачинских акцессорных минералов в ассоциации с алмазами может значительно расширить знания не только о рудообразующих процессах, связанных с современным вулканизмом, но и о неизвестном ранее процессе природного вулканогенного алмазообразования.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сейсмологические исследования на активных вулканах

Первые сейсмологические наблюдения на вулканах были организованы в Италии и в Японии в начале XX века. В 1911 г. японский сейсмолог Ф. Омори [Omori, 1911] выделил сейсмические сигналы во время извержения вулкана Усу на острове Хоккайдо. С тех пор сейсмологические наблюдения и исследования сейсмических сигналов на активных вулканах начали проводиться во всем мире. На Камчатке первая сейсмическая станция для исследования сигналов от вулканов была установлена в 1946 г. на Камчатской вулканологической станции в п. Ключи, недалеко от самого активного вулкана Ключевская сопка. В 1958 г. была организована вторая сейсмическая станция “Козыревск” в пос. Козыревск, а в 1960 г. — третья сейсмическая станция “Апахончич” в 14 км к востоку от Ключевского вулкана. С этого времени стало возможным определять координаты эпицентров вулканических землетрясений и грубо оценивать их глубину. Первые значительные результаты по исследованию сейсмичности вулканов были получены во время активизации вулкана Безымянный в 1955–1956 гг. На сейсмостанции “Ключи” в ходе активной стадии извержения было зарегистрировано более 33 тыс. землетрясений. Впервые была проведена оценка энергии вулканических землетрясений [Горшков, 1961; Токарев, 1961]. Наиболее яркими результатами по наблюдениям сейсмической станцией “Ключи”, полученными Г.С. Горшковым, было определение глубины магматического очага под Ключевским вулканом по экранизации поперечных волн от удаленных землетрясений [Горшков, 1956]. Впервые было показано, что магматические очаги располагаются глубже подошвы коры в отличие от существующих соображений о коровом расположении очагов под активными вулканами.

В начале 1960-х гг. сейсмолог П.И. Токарев провел систематизацию сейсмических событий на вулканах Ключевской и Безымянный и определил два основных типа землетрясений, связанных с деятельностью вулканов: это *землетрясения тектонические*, связанные с упругими разрушениями твердой среды, и *землетрясения вулканические*, связанные с движением жидкой или вязкой магмы. Подробное описание сейсмических событий на вулканах Ключевской группы он описал в

монографии [Токарев, 1966]. В этой же монографии П.И. Токарев заложил основы прогноза вулканических извержений по накоплению условных деформаций, определенных по сейсмическим событиям. В дальнейшем по этому параметру П.И. Токарев предсказал извержение вулкана Шивелуч в 1964 г. и начало Большого трещинного Толбачинского извержения (БТТИ) в 1975 г. К началу 1970-х гг. вблизи активных вулканов проводились наблюдения за сейсмическими сигналами уже на 7 сейсмостанциях. Кроме Ключевской группы вулканов, сейсмостанции были установлены на вулканах Карымский и Авачинский. Вблизи Карымского вулкана была создана геофизическая обсерватория, которая в дальнейшем служила базовым экспедиционным стационаром [Фирстов, Токарев, 1967].

Значительным результатом многолетних наблюдений сейсмических сигналов на вулканах Ключевской группы было создание П.И. Токаревым каталога вулканических землетрясений за все время наблюдений до 1970 г. [Токарев, 1981]. В этой монографии П.И. Токарев детально охарактеризовал все сейсмические события, связанные с вулканической деятельностью. Помимо вулканических землетрясений, происходящих на различных глубинах, и вызванных разрушением твердой среды от напряжений, создаваемых внедряемыми магматическими объемами (вулканотектонические) и землетрясениями, связанными с процессами, возникающими в магматических расплавах (низкочастотные землетрясения), он выделил взрывные землетрясения и непрерывное вулканическое дрожание. Таким образом, была заложена основа для дальнейшего детального изучения сейсмических явлений на активных вулканах.

После передачи в 1972 г. сейсмологической части Тихоокеанской экспедиции Института физики Земли АН СССР (ИФЗ АН СССР) в Институт вулканологии, появились новые возможности по развитию сейсмологических и других геофизических исследований на активных вулканах. В первую очередь, возросли финансовые и людские ресурсы. Начались активные работы по созданию и внедрению автоматических сейсмических станций для наблюдения за землетрясениями на вулканах. Были организованы две радиотелеметрические сети с 10 пунктами наблюдений на Авачинско-Корякской и Ключевской группах вулканов [Гаврилов и др., 1978].

Большой вклад в исследование сейсмических сигналов на активных вулканах был сделан во время изучения Большого трещинного Толбачинского извержения в 1975–1976 гг. Во-первых, начало и место извержения было предсказано П.И. Токаревым по сейсмическим данным с применением его методики прогноза [Токарев, 1976].

Детальные исследования вулканического дрожания в процессе извержения были выполнены с использованием автономных сейсмических станций [Гордеев и др., 1978].

После разрушительных землетрясений в Газли (Узбекская ССР) 8 апреля и 17 мая 1976 г. и землетрясения в Румынии 4 марта 1977 г., которое ощущалось в Москве с интенсивностью в 3–4 балла, в 1978 г. было принято Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР об усилении работ по прогнозу землетрясений. С 1979 г. Академии наук СССР и Академиям наук союзных республик стало выделяться дополнительное финансирование для развития сейсмологических исследований. Благодаря целевому финансированию сейсмологических наблюдений в 1980-х годах значительное развитие получили радиотелеметрические сети сейсмических станций, временные локальные сети в эпицентральных зонах сильных землетрясений и на активных вулканах. На вулканах Северной группы и на Авачинско-Корякском полигоне были существенно расширены сети радиотелеметрических сейсмических станций. Большую роль в процессе регистрации и обработки сейсмических сигналов на активных вулканах сыграл перевод системы сбора и обработки в 1996 г. на цифровой метод взамен аналогового. К настоящему времени сейсмические сети на вулканах состоят из 23 радиотелеметрических сейсмостанций (13 станций – на Северной группе вулканов, 7 – на Авачинско-Корякской группе, по одной сейсмостанции – на вулканах Карымский, Горелый и Алаид). За последние 20 лет каталог вулканических землетрясений насчитывает более 200 тыс. событий.

Кроме постоянных сетей наблюдения за вулканическими сейсмическими сигналами в разные годы на различных вулканах использовались временные сейсмические сети, состоящие из автономных сейсмостанций с накоплением информации [Гордеев и др., 1989]. Впервые такие сети были использованы во время извержения БТТИ в 1975–1976 гг. Преимуществом таких наблюдений является мобильность и возможность построения сетей любой конфигурации. Наиболее интересные результаты были получены при исследовании вулканического дрожания во время извержения Ключевского вулкана в 1984 г. [Gordeev et al., 1989]. Во время извержения вулкана Карымский в 1996–1997 гг. был проведен комплексный эксперимент с одновременным наблюдением на временных сетях сейсмических и акустических сигналов. В результате были получены характеристики сейсмических и инфразвуковых источников и определена взаимосвязь между ними [Johnson et al., 1998; Lees et al., 2004].

Геофизические наблюдения на вулканах

В конце 1960-х гг. в Институте стали развиваться режимные наблюдения за деформациями на активных вулканах. На Авачинском вулкане был создан полигон по измерению вертикальных движений на нескольких нивелирных профилях. Значительные изменения вертикальных перемещений были отмечены в непосредственной близости от Авачинского вулкана [Дмитриев, 1967]. Многочисленные и детальные геодезические наблюдения на вулканах начались в начале 1970-х гг. после создания в Институте вулканологии лаборатории геодезии (зав. лабораторией В.Б. Энман).

Наблюдения проводились классическими геодезическими методами: метод триангуляции и нивелирные профили, в некоторых случаях применялись наклонмерные наблюдения и фотоодолитные съемки. Были созданы геодезические полигоны на вулканах Авачинский, Ксудач, Карымский и Ключевской. Во время извержения Толбачинских вулканов в 1975–1976 гг. геодезические наблюдения применялись для определения деформаций в процессе образования трещин и роста шлаковых конусов [Федотов и др., 1978; Жаринов и др., 1978; Магуськин и др., 1978].

Существенное развитие исследований деформационных процессов на Камчатке началось в 1990-х гг. с применением спутниковых методов GPS и ГЛОНАСС. Применение космических дистанционных методов существенно повлияло на изучение процессов на активных вулканах. Стало возможным в оперативном режиме определять повышение температуры активных кратеров и, совместно с наземными наблюдениями за сейсмичностью, оценивать вероятность ближайших извержений. Такая работа в Институте проводится с конца 1990-х гг. и является международной кооперацией по предупреждению опасности пепловых облаков для авиации [Гирина, Гордеев, 2007].

Тектонические землетрясения и цунами

Детальные наблюдения за тектоническими землетрясениями на Камчатке были начаты в 1961 г., когда Тихоокеанской сейсмической экспедицией (ТСЭ) ИФЗ АН СССР была создана Камчатская региональная сеть сейсмических станций. До этого времени сейсмические наблюдения проводились группой сейсмостанций (“Ключи”, “Козыревск” и “Апахончич”) на Камчатской вулканостанции, сейсмостанцией “Паужетка” на юге Камчатки и базовой сейсмостанцией “Петропавловск” в г. Петропавловск-Камчатский, которая входила в Единую сеть сейсмических наблюдений (ЕССН) в СССР. В 1962 г. региональная сеть включала в себя 10 сейсмических станций. К 1971 г. региональная сеть сейсмостанций на Камчатке состояла уже из

15 станций. С 1972 г. сеть сейсмических станций была передана из Тихоокеанской сейсмической экспедиции (ТСЭ) ИФЗ АН СССР в Институт вулканологии (ИВ) ДВНЦ АН СССР. В это же время в Институте были созданы две сейсмологические лаборатории, куда перешли сотрудники Тихоокеанской сейсмической экспедиции ИФЗ АН СССР. Лаборатория сейсмометрии (зав. лабораторией В.Д. Феофилактов), которая занималась проведением и развитием сейсмических наблюдений, и лаборатория сейсмологии (зав. лабораторией И.Г. Симбирёва), где производилась обработка наблюдений и интерпретация сейсмологических данных. До 1979 г. все сейсмологические исследования тектонических землетрясений проводились в Институте вулканологии ДВНЦ АН СССР, а с 1 июля 1979 г. непрерывные сейсмологические наблюдения на территории Камчатки и Командорских островов продолжила Опытно-методическая сейсмологическая партия Института вулканологии ДВНЦ АН СССР. Благодаря целевому финансированию сейсмологических наблюдений в 1980-х гг. значительное развитие получили радиотелеметрические сети сейсмических станций, временные локальные сети в эпицентральных зонах сильных землетрясений и на активных вулканах и сеть станций сильных движений, проводились исследования сейсмичности в эпицентральных зонах сильных землетрясений и на активных вулканах [Гаврилов и др., 1978; Гордеев и др., 2006]. За все время наблюдений каталог тектонических землетрясений Камчатки и Командорских островов включает в себя более 200000 событий. Созданная на Камчатке сеть широкополосных цифровых сейсмических станций дает возможность решать следующие фундаментальные и прикладные задачи сейсмологии: изучение очагов землетрясений в области низких и высоких частот с целью определения их основных параметров: тензоров сейсмического момента, скалярных сейсмических моментов, спектров сейсмического момента (“очаговых спектров”); получение неискаженных записей сейсмических сигналов и решение обратных задач для реконструкции деталей очагового процесса; оценка размеров очагов и длительностей процессов в очаге; изучение особенностей очагов в различных тектонических и глубинных зонах, а также особенностей очагов вулканических и цунамигенных землетрясений; изучение строения, скоростных и поглощающих свойств коры и верхней мантии.

Были получены первые точные данные о размещении очагов землетрясений Камчатки и Командорских островов. Каталоги и другие данные о сейсмичности с 1962 г. постоянно публиковались в ежегодниках “Землетрясения в СССР”. Была разработана энергетическая классификация этих землетрясений [Федотов, 1972]. Изуча-

лись свойства верхней мантии и связь землетрясений с вулканизмом. Изучались сильные землетрясения тех лет: Озерновское землетрясение 22(23) ноября 1969 г., $M_w = 7.7$, интенсивность сотрясений в пунктах побережья до 8 баллов; Петропавловское землетрясение 24(25) ноября 1971 г., $M_w = 7.5$, интенсивность сотрясений в г. Петропавловск-Камчатский до 7 баллов; Усть-Камчатское землетрясение 15 декабря 1971 г., $M_w = 7.8$, интенсивность сотрясений в пос. Усть-Камчатск до 8 баллов [Гусев и др., 1975; Сильные ..., 1975; Федотов и др., 1973].

В 1960-х годах были открыты фундаментальные закономерности размещения очагов сильнейших землетрясений, выделены вероятные места следующих таких землетрясений – “сейсмические бреши”, введено понятие “сейсмический цикл” сильнейших землетрясений, и на их основе создан метод долгосрочного сейсмического прогноза [Федотов, 1968].

В последующие годы на основе данных детальных наблюдений были получены новые фундаментальные результаты: по физике очага сильного землетрясения [Гусев, 1988]; по строению и свойствам земной коры на Камчатке [Абубакиров, 2005; Гонтовая и др., 2010; Гордеев и др., 2009; Кузин и др., 2004; Gusev, Abubakirov, 1999a, 1999b]; по решению задачи расчета синтетических сейсмограмм [Павлов, Гусев, 1980]. Исследовались закономерности сейсмичности на локальном уровне [Горельчик и др., 1988].

Важным направлением исследований природных процессов, способных вызывать природные катастрофы, являются исследования цунами. В СССР эта проблема возникла после катастрофического цунами, вызванного Большим Камчатским землетрясением 1952 г., что привело к значительным разрушениям на Восточном побережье Камчатки, полностью уничтожило г. Северо-Курильск на острове Парамушир. Была срочно создана Служба предупреждения цунами на базе сейсмических станций “Петропавловск” и “Южно-Сахалинск”. В настоящее время служба цунами находится в составе Гидрометеослужбы и обеспечивается сейсмическими данными от Геофизической службы РАН.

В Институте вулканологии исследования цунами, в основном, были связаны с восстановлением исторических цунами по палеотолжениям в прибрежной зоне. Восстановлены параметры исторических цунами на Восточном побережье Камчатки на 5000 лет в прошлом и определена периодичность возникновения катастрофических цунами [Pinegina et al., 2003, 2018]. Все эти результаты дают возможность прогнозировать разрушительные цунами в будущем.

Структурные исследования

Одним из важнейших направлений исследования вулканических структур было определение строения среды различными методами. Наиболее развитыми были сейсморазведочные методы. В Институте вулканологии применялось сейсмическое профилирование методом КМПВ (Корреляционный Метод Преломленных Волн). Этим методом наиболее полно была исследована зона Новых Толбачинских вулканов [Балеста и др., 1978]. В дополнении к сейсморазведочным методам использовались электромагнитные методы. Метод МТЗ (Магнито-Теллурическое Зондирование) применялся для определения структурных образований с высокой проводимостью электрического тока, что могло быть связано с магматическими телами или флюидонасыщенными породами [Мороз, 1991].

В 1990-е годы на Камчатке начали применяться сейсмотомографические методы исследования, которые позволяют строить трехмерные скоростные модели среды. В первых работах использовались данные наблюдений стандартных систем сейсмических наблюдений [Гонтовая, Сениуков, 2000; Gorbatov et al., 1999]. Дальнейшее развитие сейсмотомографические методы получили при детальном исследовании строения среды с использованием сейсмологических данных, полученных на специально организованных плотных сетях сейсмических наблюдений на временных автономных сейсмических станциях. Такие наблюдательные сети создавались в районах активных вулканов. Так, в районе Ключевской группы вулканов в 2012–2013 гг. была установлена сеть, состоящая более чем из 120 сейсмостанций. По результатам этих наблюдений была определена скоростная модель среды под Ключевской группой вулканов до глубин 60 км [Кулаков и др., 2016; Koulakov et al., 2017, 2020; Gordeev et al., 2020].

Авторы настоящей статьи сделали обзор научных достижений Института в области фундаментальных и прикладных исследований по проблемам современного вулканизма и связанных с ним процессов за период 1962–2021 гг. Результаты этих исследований высоко оценены отечественной и мировой наукой, о чем свидетельствуют многочисленные ссылки в научных публикациях и достаточно широкое международное сотрудничество вулканологов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абубакиров И.Р. Оценка характеристик затухания поперечных волн в литосфере Камчатки по наблюдениям цифровой широкополосной станции “Петропавловск” // Физика Земли. 2005. № 10. С. 46–58.
Аверьев В.В. Условия разгрузки Паужетских гидротерм на юге Камчатки // Труды Лаборатории вулканологии АН СССР. 1961. Вып. 19. С. 80–98.

Базанова Л.И., Мелекесцев И.В., Пономарёва В.В. и др. Вулканические катастрофы позднего плейстоцена–голоцена на Камчатке и Курильских островах. Часть 1. Типы и классы катастрофических извержений – главных компонентов вулканического катастрофизма // Вулканология и сейсмология. 2016. № 3. С. 3–21.
Балеста С.Т., Каргопольцев А.А., Григорян Г.Б. Строе-ние Новых Толбачинских вулканов по сейсмическим данным, геологические и геофизические данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. М.: Наука, 1978. С. 225–233.
Вергасова Л.П., Карнов Г.А., Филатов С.К. Минералогия вулканических эксгалаций и измененных пород современных газо-гидротермальных систем Камчатки // История науки и техники. 2017. № 7. С. 52–66.
 Включения в вулканических породах Курило-Камчатской островной дуги / Под ред. Б.Г. Лутца, К.Н. Рудича, В.А. Ермакова. М.: Наука, 1978. 223 с.
Вольнец О.Н. Петрология и геохимическая типизация вулканических серий современной островодужной системы / Автореф. дис. ... доктора геол.-мин. наук. М., 1993. 67 с.
Вольнец О.Н., Ермаков В.А., Кирсанов И.Т., Дубик Ю.М. Петрохимические типы четвертичных базальтов Камчатки и их геологическое положение // Бюлл. вулканол. станций. 1976. № 52. С. 115–126.
Вольнец О.Н., Флёргов Г.Б., Андреев В.Н. и др. Петрохимия, геохимия и вопросы генезиса пород Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. // Докл. АН СССР. 1978. Т. 238. № 4. С. 940–943.
Гаврилов В.А., Малкин А.П., Чебров В.Н., Сорокин В.В. Радиотелеметрическая система сбора сейсмической информации на Авачинско-Корякском полигоне // Бюлл. вулканол. станций. 1978. № 54. С. 22–26.
Галимов Э.М., Карнов Г.А., Севастьянов В.С. и др. Алмазы в продуктах извержения вулкана Толбачик (Камчатка 2012–2013 гг.) и механизм их образования // Геохимия. 2016. № 10. С. 868–872.
Гирина О.А., Гордеев Е.И. Проект KVERT – снижение вулканической опасности для авиации при эксплозивных извержениях вулканов Камчатки и Северных Курил // Вестник ДВО РАН. 2007. № 2. С. 100–109.
Гонтовая Л.И., Попруженко С.А., Низкоус И.В. Структура верхней мантии зоны перехода океан – континент в районе Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2010. № 4. С. 13–19.
Гонтовая Л.И., Сениуков С.Л. О сейсмической модели земной коры Авачинского вулкана на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2000. № 3. С. 57–62.
Гордеев Е.И., Карнов Г.А., Аникин Л.П. и др. Алмазы в лавах Трещинного Толбачинского извержения на Камчатке // Докл. РАН. 2014. № 454(2). С. 204–206.
Гордеев Е.И., Феофилактов В.Д., Чебров В.Н. Исследование вулканического дрожания Толбачинского извержения // Геологические и геофизические данные о БТТИ в 1975–1976 гг. М.: Наука, 1978. С. 151–163.
Гордеев Е.И., Мельников Ю.Ю., Попов Е.В. и др. Аппаратурно-методический комплекс для временных локальных сейсмометрических сетей // Сейсмологические наблюдения на Дальнем Востоке СССР. М.: Наука, 1989. С. 5–15.

- Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И. и др.* Система сейсмологических наблюдений на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 6–27.
- Гордеев Е.И., Дроздина С.Я., Шапиро Н.М.* Строение коры и верхней мантии в зоне сочленения Тихоокеанской, Северо-Американской и Евразийской литосферных плит // Докл. РАН. 2009. Т. 428. № 3. С. 392–336.
- Горельчик В.И., Чубарова О.С., Гарбузова В.Т.* Сейсмичность района Северной группы вулканов Камчатки в 1971–1983 гг. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 1. С. 90–100.
- Горшков Г.С., Богоявленская Г.Е.* Вулкан Безымянный и особенности извержения 1955–1963 гг. М.: Наука, 1965. 171 с.
- Горшков Г.С., Дубик Ю.М.* Направленный взрыв вулкана Шивелуч // Вулканы и извержения. М.: Наука, 1969. С. 3–37.
- Горшков Г.С.* О связи вулканических и сейсмических явлений при извержении вулкана Безымянного (1955–1956 гг.) // Бюлл. вулканол. станций. 1961. № 31. С. 32–37.
- Горшков Г.С.* О глубине магматического очага Ключевского вулкана // Докл. АН СССР. 1956. Т. 106. № 4. С. 703–705.
- Гусев А.А.* Модель очага землетрясения с множеством неровностей // Вулканология и сейсмология. 1988. № 1. С. 41–45.
- Гусев А.А., Зобин В.М., Кондратенко А.М., Шумилина Л.С.* Усть-Камчатское землетрясение 15.XII.1971 // Землетрясения в СССР в 1971 г. М.: Наука, 1975. С. 172–184.
- Гущенко И.И.* Извержения вулканов Мира. Каталог. М.: Наука, 1979. 476 с.
- Дмитриев Л.Б.* Повторные геодезические работы на Авачинском вулкане // Бюлл. вулканол. станций. 1967. № 43. С. 2–26.
- Дмитриев Л.Б.* Изменение отметок реперов Авачинского полигона в 1967–1968 гг. // Бюлл. вулканол. станций. 1970. № 46. С. 15–16.
- Ермаков В.А., Милановский Е.Е., Таракановский А.А.* Значение рифтогенеза в формировании четвертичных вулканических зон Камчатки // Вестник МГУ. Сер. Геология. 1974. № 3. С. 3–20.
- Ермаков В.А.* Формационное расчленение четвертичных вулканических пород. М.: Недра, 1977. 223 с.
- Жаринов Н.А., Доброхотов Ю.С., Магуськин М.А., Эрман С.В.* О наклонах земной поверхности при образовании Второго конуса Трещинного Толбачинского извержения 1975 г. // Геологические и геофизические данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. М.: Наука, 1978. С. 213–216.
- Карпов Г.А.* Экспериментальное минералообразование в геотермальных скважинах. М.: Наука, 1976. 172 с.
- Карпов Г.А.* Современные гидротермы и ртутно-сурьмяно-мышьяковое оруденение. М.: Наука, 1988. 183 с.
- Карпов Г.А., Силаев В.И., Аникин Л.П. и др.* Алмазы и сопутствующие минералы в продуктах трещинного извержения 2012–2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2014. № 6. С. 3–20.
- Карпов Г.А., Силаев В.И., Аникин Л.П. и др.* Вулканогенный углеродный парагенезис на Камчатке // История науки и техники. 2017. № 7. С. 67–77.
- Кириухин А.В., Федотов С.А., Кириухин П.А. и др.* Магматические питающие системы Корякско-Авачинской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и режима прилегающих термальных источников // Вулканология и сейсмология. 2017. № 5. С. 3–17.
- Кириухин А.В.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем. СПб.: “Эко-Вектор”, 2020. 431 с.
- Кириухин А.В., Кириухин П.А., Манухин Ю.Ф.* Гидрогеология вулканогенов. СПб.: Наука, 2010. 395 с.
- Кириухин А.В., Сугробов В.М.* Геотермальные ресурсы Камчатки и ближайшие перспективы их освоения // Вулканология и сейсмология. 2019. № 6. С. 50–65.
- Кузин И.П., Левина В.И., Левченко Д.Г. и др.* О скоростях волн Р и S в зоне Беньофа Южной Камчатки // Физика Земли. 2004. № 2. С. 3–14.
- Кулаков И.Ю., Кукарина Е.В., Гордеев Е.И. и др.* Магматические источники в мантийном клине под вулканами Ключевской группы и вулкана Кизимен (Камчатка) по данным сейсмической томографии // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 1. С. 109–124.
- Магуськин М.А., Эрман В.Б., Целищев В.С.* Изменение высоты, объема и формы новых Толбачинских вулканов Северного прорыва // Геологические и геофизические данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг. М.: Наука, 1978. С. 217–224.
- Мархинин Е.К.* Роль вулканизма в формировании земной коры. М.: Наука, 1967. 255 с.
- Мархинин Е.К.* Вулканы и жизнь. М.: Изд-во “Мысль”, 1980. 196 с.
- Мархинин Е.К., Подклетнов Н.Е.* Явление образования предбиологических соединений при извержении вулкана Толбачик // Докл. АН СССР. 1977. Т. 235. № 5. С. 1203–1206.
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Пономарёва В.В., Сулержицкий Л.Д.* Возраст и динамика формирования действующих вулканов Курило-Камчатской области // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1990. № 4. С. 17–31.
- Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Шапарь В.Н.* Геохимические особенности эксгаляций Большого трещинного Толбачинского извержения. М.: Наука, 1980. 235 с.
- Мороз Ю.Ф.* Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. М.: Наука, 1991. 181 с.
- Набоко С.И.* Гидротермальный метаморфизм пород в вулканических областях. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 172 с.
- Озеров А.Ю.* Ключевской вулкан: вещество, динамика, модель. Петропавловск-Камчатский, М.: Изд-во “ГЕОС”, 2019. 305 с.
- Павлов В.М., Гусев А.А.* К возможности восстановления движения в очаге глубокого землетрясения по полю объемных волн в дальней зоне // Докл. АН СССР. 1980. Т. 255. № 4. С. 834–828.
- Паужетские горячие воды на Камчатке. М.: Наука, 1965. 208 с.
- Пийп Б.И.* Термальные ключи Камчатки. М., Л.: Изд-во АН СССР, 1937. 268 с.

- Пийп Б.И.* Ключевская сопка и ее извержения в 1944–1945 гг. и в прошлом. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 311 с.
- Ронов А.Б., Ярошевский А.А.* Новая модель химического строения земной коры // *Геохимия*. 1976. № 2. С. 1763–1794.
- Рычагов С.Н.* Эволюция гидротермально-магматических систем островных дуг / Автореф. дис. ... доктора геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ РАН, 2003. 50 с.
- Рычагов С.Н.* Гигантские газо-гидротермальные системы и их роль в формировании пародоминирующих геотермальных месторождений и рудной минерализации // *Вулканология и сейсмология*. 2014. № 2. С. 3–28.
- Силаев В.И., Карпов Г.А., Аникин Л.П. и др.* Минерально-фазовый парагенезис в эксплозивных продуктах современных извержений вулканов Камчатки и Курил. Часть I. Алмазы, углеродные фазы, конденсированные органиды // *Вулканология и сейсмология*. 2019а. № 5. С. 54–67.
- Силаев В.И., Карпов Г.А., Аникин Л.П. и др.* Минерально-фазовый парагенезис в эксплозивных продуктах современных извержений вулканов Камчатки и Курил. Часть 2. Минералы-спутники алмазов толбачинского типа // *Вулканология и сейсмология*. 2019б. № 6. С. 36–49.
- Сильные камчатские землетрясения 1971 г. / Отв. ред. С.А. Федотов. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1975. 156 с.
- Словцов И.Б.* Минералого-геохимические критерии физико-химических условий в недрах геотермальных месторождений (на примере Мутновского геотермального месторождения, Камчатка) / Автореф. дис. ... кандидата геол.-мин. наук. М., 1994. 29 с.
- Сугробов В.М.* Геотермальные ресурсы Курило-Камчатского региона // *Энергетические ресурсы Тихоокеанского региона*. М.: Наука, 1982. С. 93–107.
- Таран Ю.А.* Геохимия геотермальных газов. М.: Наука, 1988. 167 с.
- Токарев П.И.* Энергетическая оценка силы землетрясений вулкана Безымянного // *Бюлл. вулканол. станций*. 1961. № 31. С. 38–45.
- Токарев П.И.* Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. М.: Наука, 1966. 118 с.
- Токарев П.И.* Предсказание места и времени начала Большого трещинного Толбачинского извержения в июле 1975 г. // *Докл. АН СССР*. 1976. Т. 229. № 2. С. 439–442.
- Токарев П.И.* Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
- Трухин Ю.П., Петрова В.В.* Некоторые закономерности современного гидротермального процесса. М.: Наука, 1965. 208 с.
- Федотов С.А., Сугробов В.М., Уткин И.С., Уткина Л.И.* Возможности использования тепла магматического очага Авачинского вулкана и окружающих его пород для тепло- и электроснабжения // *Вулканология и сейсмология*. 2007. № 1. С. 32–46.
- Федотов С.А., Эрман В.Б., Магуськин М.А. и др.* Деформации земной поверхности вблизи новых Толбачинских вулканов (1975–1976 гг.) // *Геологические и геофизические данные о Большом трещинном Толбачинском извержении 1975–1976 гг.* М.: Наука, 1978. С. 189–199.
- Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
- Федотов С.А., Гусев А.А., Зобин В.М. и др.* Озерновское землетрясение и цунами 22(23) ноября 1969 г. // *Землетрясения в СССР в 1969 г.* М.: Наука, 1973. С. 195–208.
- Федотов С.А.* О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // *Сейсмическое районирование СССР*. М.: Недра, 1968. С. 121–150.
- Филатов С.К., Кривовичев С.В., Вергасова Л.П.* От вулкана к атому – кислородно-металлические комплексы в вулканических газах и минералах // *Многогранная геология* / Под ред. В.В. Гавриленко. СПб.: ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга, 2015. Вып. 111. 444 с.
- Фирстов П.П., Токарев П.И.* Сейсмологические исследования вулкана Карымский // *Бюлл. вулканол. станций*. 1967. № 43. С. 9–22.
- Хубуная С.А., Гонтовая Л.И., Соболев А.В., Хубуная В.С.* К вопросу о магматических очагах под вулканом Ключевской (Камчатка) // *Вулканология и сейсмология*. 2018. № 2. С. 14–29.
- Хубуная С.А., Ерёмкина Т.С., Соболев А.В.* Формационная принадлежность К-трахиандезитбазальтов побочного извержения вулкана Плоский Толбачик 2012–2013 гг. (ТТИ-50) по геохимическим признакам // *Вулканология и сейсмология*. 2016. № 2. С. 1–19.
- Galimov E.M., Kaminsky F.V., Shilobreeva S.N. et al.* Enigmatic diamonds from the Tolbachik volcano, Kamchatka // *American Mineralogist*. 2020. V. 105. P. 498–509.
- Gorbatov A. J., Dominguez G. Suarez, Gordeev E.I.* Tomographic imaging of the P-wave velocity structure beneath the Kamchatka peninsula // *Geophys. J. Int.* 1999. V. 137. P. 269–279.
- Gordeev E.I., Melnikov Y.Y., Sinitsyn V.I., Chebrov V.N.* Volcanic Tremor of Kliuchevskoi Volcano (1984 Eruption) // *IAVCEI Proceedings in Volcanology* / Ed. J.H. Latter // *Volcanic Hazards*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1989. P. 486–503.
- Gordeev E.I., Koulakov I.Y., Shapiro N.M.* The Magma Feeding System of the Klyuchevskaya Group of Volcanoes (Kamchatka) // *Dokl. Earth Sci.* 2020. V. 493. P. 627–631. <https://doi.org/10.1134/S1028334X20080085>
- Gusev A.A., Abubakirov I.R.* Vertical profile of effective turbidity reconstructed from broadening of incoherent body-wave pulses – I. General approach and the inversion procedure // *Geophys. J. Int.* 1999a. V. 136. P. 295–308.
- Gusev A.A., Abubakirov I.R.* Vertical profile of effective turbidity reconstructed from broadening of incoherent body-wave pulses – II. Application to Kamchatka data // *Geophys. J. Int.* 1999b. V. 136. P. 309–323.
- Johnson J.B., Lees J.M., Gordeev E.I.* Degassing Explosions at Karymski Volcano, Kamchatka // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. № 21. P. 3999–4002.
- Koulakov I., Abkadyrov I., Al Arifi N. et al.* Three different types of plumbing system beneath the neighboring active volcanoes of Tolbachik, Bezymianny, and Klyuchevskoy in

Kamchatka // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2017. V. 122. <https://doi.org/10.1002/2017JB014082>

Koulakov I., Shapiro N., Sens-Shoenfelder C. et al. Mantle sources of magmatic activity in the Northern group of volcanoes in Kamchatka inferred from earthquake tomography // J. Geophys. Res. Solid Earth. 2020. e2020JB020097. <https://doi.org/10.1029/2020JB020097>

Lees J.M., Gordeev E.I., Ripepe M. Explosion and periodic tremor at Karymsky volcano, Kamchatka, Russia // Geophys. J. Int. 2004. V. 158. P. 1151–1167. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02239.x>

Pinegina T.K., Bourgeois J., Bazanova L.I. et al. A millennial-scale record of Holocene tsunamis on the Kronotskiy Bay coast, Kamchatka, Russia // Quaternary Research. 2003. № 59(1). P. 36–47.

Pinegina T.K., Bazanova L.I., Zelenin E.A. et al. Holocene Tsunamis in Avachinsky Bay, Kamchatka, Russia // Pure and Applied Geophysics. 2018. V. 175. № 4. P. 1485–1506.

Shevchenko A.V., Dvigalo V.N., Walter T.R. et al. The rebirth and evolution of Bezymianny volcano, Kamchatka after the 1956 sector collapse // Nature communication Earth & environment. 2020. V. 1(1). P. 1–15.

Okrugin V., Favero M., Liu A. et al. Smoking gun for thallium geochemistry in volcanic arcs: Nataliyamalikite, TII, a new thallium mineral from an active fumarole at Avacha Volcano, Kamchatka Peninsula, Russia // American Mineralogist. 2017. V. 102. P. 1736–1746.

Okrugin V., Kudaeva Sh., Karimova O. et al. The new mineral novograbenovite, $(\text{NH}_4, \text{K})\text{MgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ from the Tolbachik volcano, Kamchatka, Russia: mineral description and crystal structure // Mineralogical Magazine. 2019. V. 83. P. 223–231.

Omori F. The Usa-San eruption and the earthquake and elevation phenomena // Bull. Imp., Earthquake Investigation Comete. Tokyo, 1911. V. 5. № 1. P. 1–38.

Results of Fundamental Research of Volcanoes and Earthquakes in Kamchatka Made by Academic Science

E. I. Gordeev^{1, *} and G. A. Karpov^{1, **}

¹Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia

*e-mail: gordeev@kscnet.ru

**e-mail: karpovga@kscnet.ru

The article reviews the results of scientific research of the staff of the Institute of Volcanology and Seismology of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences for the period 1962–2021, which are of fundamental importance. The most important achievements in the sections are considered: *Volcanological research* – petrological and geochemical features of volcanic eruptions of the Kuril-Kamchatka region; age of volcanoes and stages of volcanogenic catastrophism in Kamchatka; hydrothermal systems and geothermal resources of Kamchatka; hydrothermal metasomatism and volcanogenic mineral ore formation. *Geophysical research* – seismology of volcanoes; deformation processes on active volcanoes; tectonic earthquakes and tsunamis; internal structure of volcanic systems.

Keywords: Kamchatka, volcano, eruption, seismicity, tsunamis, magmatic foci, geothermal resources, petrogenesis, mineralogy, geochemistry, diamonds, isotopy