



**Толбачинское
трещинное извержение
2012-2013 гг.**



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ ИМ. А.А. ТРОФИМУКА
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ВУЛКАНОЛОГИИ И СЕЙСМОЛОГИИ

ТОЛБАЧИНСКОЕ ТРЕЩИННОЕ ИЗВЕРЖЕНИЕ 2012–2013 гг. (ТТИ-50)

Ответственные редакторы:
академик *Е.И. Гордеев*
академик *Н.Л. Добрецов*



НОВОСИБИРСК
ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

2017

Толбачинское трещинное извержение 2012–2013 гг. (ТТИ-50) / [Е.И. Гордеев и др.]; отв. ред. Е.И. Гордеев, Н.Л. Добрецов; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука, Дальневосточное отд-ние, Ин-т вулканологии и сейсмологии. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. – 421 с.

В настоящей монографии представлены результаты комплексных исследований Толбачинского трещинного извержения 2012–2013 гг. (ТТИ-50). Экспедиционными отрядами Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН с участием других институтов и Геофизической службы РАН проводились наблюдения за ходом извержения, отбирались образцы изверженных продуктов, с помощью спутниковых наблюдений и аэрофотосъемки оценивались развитие лавовых потоков и их объем. Непрерывные сейсмические наблюдения и данные GPS станций позволили оценить деформационные процессы, связанные с извержением. В книге подробно рассматриваются обобщенная вулканотектоническая позиция Ключевской группы вулканов и Толбачинского вулканического массива, развитие сейсмичности и деформационных процессов, предшествующих и сопровождавших ТТИ-50. Проведено детальное исследование вещественного состава продуктов извержения. Предыдущее трещинное извержение в этой зоне (БТТИ) произошло в 1975–1976 гг. и было детально изучено различными методами, но за 36 лет появились новые технологии, которые позволили исследовать ТТИ-50 на современном уровне. Дистанционные исследования содержания газа в вулканических облаках, спутниковые наблюдения за распространением пепловых выбросов и лавовых потоков, а также инфракрасная съемка лавовых полей и активных кратеров и синвулканические геохимические и петрологические исследования дали возможность детально реконструировать весь процесс извержения. Изучение изменения вещественного состава продуктов извержения ТТИ-50 во времени показало, что в начале извержения была дренирована верхняя, более остывшая и фракционированная, часть магматического очага. В последующем на поверхность начали поступать расплавы из более глубоких частей очага; геохимически это выразилось в смене состава пород. Детальное строение среды под Толбачинским вулканическим массивом было получено по данным наблюдений 30 сейсмических станций, специально установленных для исследования скоростной структуры. Сейсмотомографическая модель определяет несколько каналов питания вулкана Плоский Толбачик и ареальной зоны шлаковых конусов на Толбачинском доле. По предварительным данным определена взаимосвязь между глубинными зонами питания вулканов Ключевской, Безымянный и Толбачик. Результаты, представленные в монографии, позволят сделать важные обобщения по механизму подобных извержений, строению коры и мантии под Ключевской группой вулканов и определению сложной системы магматического питания Толбачинского вулканического массива, связанной с общими особенностями Камчатской зоны субдукции.

Книга адресована специалистам в области петрологии, геологии, геофизики вулканизма, студентам и аспирантам соответствующих специальностей.

Рецензенты:

доктор геолого-минералогических наук *А.Э. Изов*
доктор геолого-минералогических наук *Ю.А. Таран*
кандидат физико-математических наук *А.А. Дучков*

Утверждено к печати Ученым советом

Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука РАН

В среднем – верхнем плейстоцене (65–30 тыс. лет) изливались андезиты в вулканах Однобокий, Двор, Пра-Семячик, Пра-Карымский в объеме около 80 км³. В позднем плейстоцене – голоцене (30 тыс. лет) возникли новые вулканы и малые кальдеры. Магматизм по составу дифференцировался. В южном ареале преобладали риолитовые туфы и игнимбриты, в северном – базальты или контрастные извержения. В кислой пирокластике обычно присутствует амфибол, в андезитах и базальтах – кумулятивные и родственные включения (Ol + An, Orx + An). Во всех породах отчетливо проявлены минимум Ta-Nb и максимумы Ba, U, K, Sr, Pb, типичные для островодужных серий.

4. Срединный хребет. На первой стадии (поздний миоцен – ранний плиоцен, 7,5–3,5 млн лет) сформировалась алнейская серия контрастного состава с преобладанием базальтов и риолитов. Интрузивные тела представлены диоритами и гранодиорит-порфирами с Au-Ag и Au-Hg оруденением.

На втором этапе в осевой зоне хребта и западных склонах сформировались 120 полигенных вулканов и около 1000 моногенных шлаковых и лавовых конусов объемом 3500 км³ [Огородов и др., 1972; Мелекесцев и др., 1991]. Выделяются подстадии: а) поздний плиоцен – ранний плейстоцен (0,75–0,3 млн лет), представлен платобазальтами и щитовыми вулканами; б) средний плейстоцен (2,5–1 млн лет) – дифференцированные вулканические центры с концентрацией дацит-риолитовых лав и игнимбритов (вулканы Уксичан, Ичинский, Хангар); в) поздний плейстоцен – голоцен (200 тыс. лет – 0) – недифференцированные базальты и субщелочные базальты, как высоко-, так и умеренно-калиевая серия. Намечается отчетливая геохимическая зональность с высококалиевыми базальтами в тыловой зоне (вулкан Бол. Кетепан).

В следующем разделе описаны четвертичные вулканы Ключевской группы и их сопоставление с Восточным поясом и Срединной Камчаткой. Здесь отчетливо проявляются пояса базальтового и дацит-андезитового вулканизма, которые почти не совмещены. Проблема самостоятельного базальтового магматизма в островных дугах и особая роль калиевых базальтоидов обсуждаются в заключительной главе.

Количественная оценка объема вулканизма на Камчатке в течение последних 0,8 млн лет приведена в гл. 1 (см. рис. 1.1) по данным [Лаверов и др., 2005].

При обилии факторов, регулирующих процессы магматизма в зонах субдукции, возникало множество частных случаев. Фактически каждый крупный вулкан представляет уникальную систему, что определяет существенные различия в характере и интенсивности вулканизма в разных секторах вулканической дуги и отдельных крупных регионах. Выше мы попытались это показать на примере четырех районов Восточной и Центральной Камчатки. На рис. 1.12 была приведена эволюция вулканизма в Северо-Западной Японии в течение последних двух миллионов лет, которая также наглядно иллюстрирует вышесказанные тезисы.

2.2. КЛЮЧЕВСКАЯ ГРУППА ВУЛКАНОВ И ТОЛБАЧИНСКИЙ ВУЛКАНИЧЕСКИЙ МАССИВ: ИТОГИ ИССЛЕДОВАНИЙ ЧЕТВЕРТИЧНОГО ВУЛКАНИЗМА ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ ИЗВЕРЖЕНИЮ 2012–2013 гг.

Ключевская группа вулканов (КГВ) располагается в северной части Центральной Камчатской депрессии (ЦКД) и является одной из самых крупных и наиболее активных вулканических структур на Камчатке и в мире (рис. 2.3). В южной части КГВ находится позднеплейстоцен-голоценовый Толбачин-

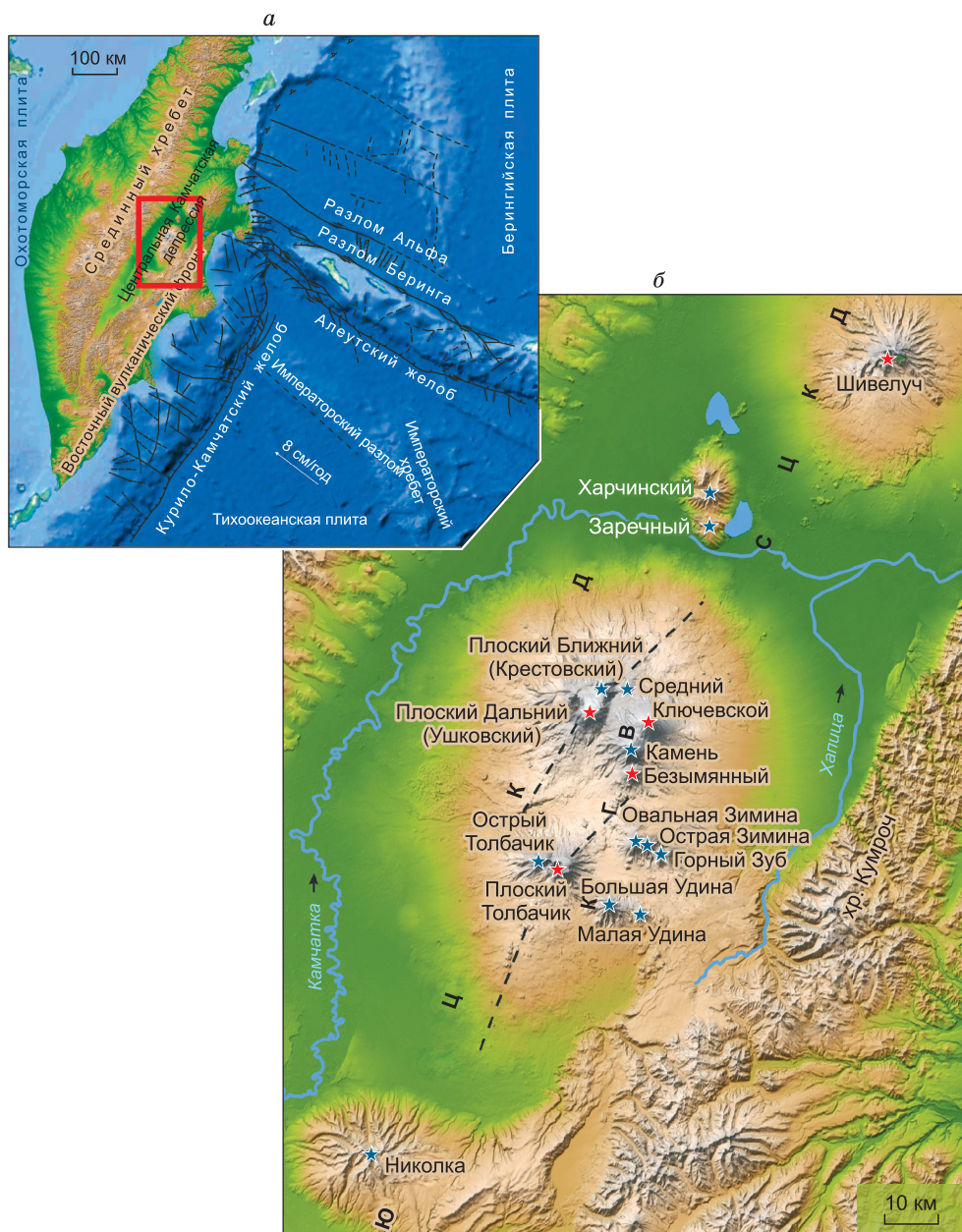


Рис. 2.3. Физико-географическое и тектоническое положение Центральной Камчатской депрессии и Ключевской группы вулканов.

а – положение Восточного вулканического фронта, Центральной Камчатской депрессии и Срединного хребта, а также важнейших тектонических элементов. Разломы и предполагаемые разломы показаны сплошными и пунктирными линиями соответственно. Тихоокеанская плита субдуцирует под Охотскую плиту, формируя Камчатский преддуговой желоб (сплошная линия с треугольниками) на границе между двумя плитами. Относительное движение Тихоокеанской и Берингийской океанических плит создает систему трансформных разломов: Алеутский желоб, разлом Беринга и разлом Альфа. Разломы, желоба и разрывы на морском дне приведены по [Селиверстов, 1998]. *б* – обзорная карта ЦКД, показывающая расположение активных (красные звезды) и потухших (синие звезды) вулканов. Предполагаемые рифтоподобные разломы на вулканических массивах Толбачинский и Плоские Сопки показаны пунктирными линиями по [Мелекесцев и др., 1991]

Таблица 2.2

Региональные маркирующие прослои тефры в отложениях Толбачинского дола

Маркирующие прослои тефры	Вулкан-источник	Возраст, тыс. лет	Прежние обозначения этих прослоев	Прежние оценки возраста, тыс. ^{14}C лет назад
SH_2	Шивелуч	0.8	SH_2	0.9–1.0
SH_3	Шивелуч	1.4	SH_3	1.4–1.5
KS_1	Ксудач	1.7	SH_4	2.0
SH_5	Шивелуч	1.9	SH_5	2.5–2.6
KHG	Хангар	7.8	SH_6	7.5

Примечание. В третьем столбце дан возраст в калиброванных ^{14}C годах, округленный до ближайших ста лет [Ropomareva et al., 2015]. Прежние обозначения и возрасты этих прослоев (два последних столбца) приведены в статье [Брайцева и др., 19846]. В последнем столбце приведен средний ^{14}C возраст.

ский массив, который извергался неоднократно в течение голоцена и исторического времени (см. рис. 2.3).

Первые исторические описания активности Толбачинского массива были выполнены русским исследователем Степаном Крашенинниковым [1755], сделавшим записи об извержении Толбачика 1739 года. Позднее, в течение 20-го столетия, исследователи изучали и публиковали данные о многочисленных доисторических и исторических извержениях как на вершине вулкана Плоский Толбачик, так и в зоне моногенных конусов на юго-юго-западном фланге массива (рис. 2.4, табл. 2.2). В основном эти работы были посвящены динамике извержений и постэруптивным изменениям, морфологии вершин-

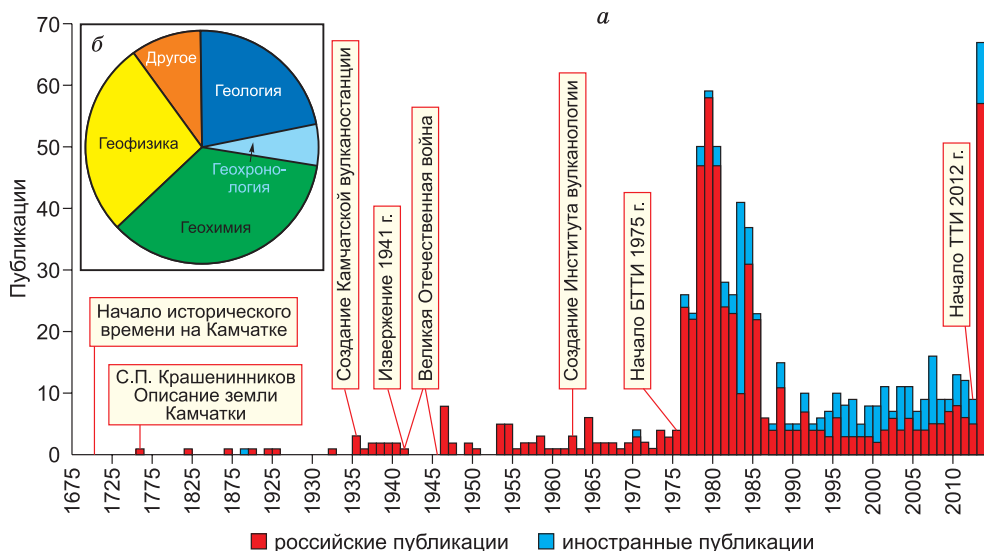


Рис. 2.4. Анализ литературных источников о Толбачинском вулканическом массиве.

a – гистограмма, показывающая изменение количества публикаций по времени. Временная шкала разделена на два интервала: с делениями в 50 лет до 1925 г. и в 5 лет после 1925 г. Текстом в рамках отмечены основные исторические события, влиявшие на количество публикаций; *б* – диаграмма распределения опубликованной литературы о Толбачинском массиве по научным направлениям. «Геология» включает динамическую геологию, тектонику и общую геологию; «Геохимия» – петрологию, минералогию, геохимию и изотопную геохимию; «Геофизика» – все геофизические методы; «Геохронология» – тефрохронологию и геоморфологию, «Другое» – все другие научные направления

ной части вулкана (в том числе [Влодавец, 1937; Пийп, 1946, 1954; Попков, 1946; Меняйлов, 1953; Сирин, Фарберов, 1963; Кирсанов, Пономарев, 1974]).

Всемирную известность вулкан Толбачик приобрел только после Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. (БТТИ), когда в течение полутора лет на южном склоне вулкана сформировались четыре новых моногенных конуса и связанные с ними лавовые поля [Федотов, 1984]. Это извержение излило на поверхность высоко-Mg и высоко-Al базальты с общим объемом продуктов извержения (лава и тефра) 2,2 км³, что сделало его одним из крупнейших извержений XX века. В период между БТТИ и извержением 2012–2013 гг. множество публикаций в российских и международных журналах (см. рис. 2.4) представляли данные об извержении Толбачика 1975–1976 гг. (в том числе [Fedotov, Markhinin, 1983; Федотов, 1984; Действующие вулканы Камчатки, 1991; Kersting, 1995; Hochstaedter et al., 1996; Kepezzhinskas et al., 1997; Turner et al., 1998; Pineau et al., 1999; Волюнец и др., 2000; Чурикова и др., 2001; Churikova et al., 2001; Münker et al., 2004; Portnyagin et al., 2007a]). Благодаря этому к настоящему времени большинство существующей информации по Толбачинскому вулканическому массиву относится к извержению 1975–1976 гг. В то же время другие части этого грандиозного массива и прилегающие к нему моногенные конусы и лавовые поля изучались в гораздо меньшей степени.

В той же зоне моногенных конусов, что и извержение 1975–1976 гг., в 2012 г. началось новое крупное извержение – Трещинное Толбачинское извержение имени 50-летия ИВиС (ТТИ-50). Задача настоящего раздела – дать обзор накопленных знаний и существующих гипотез по геологии, тектонике, петрологии, геохимии, геофизике и истории развития Толбачинского вулканического массива к началу ТТИ-50.

2.2.1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ И ТЕКТОНИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ КАМЧАТСКОЙ ДЕПРЕССИИ И КЛЮЧЕВСКОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ

Как отмечалось в гл. 1, Камчатка располагается на конвергентной границе Охотской и Тихоокеанской плит (см. рис. 2.3). Тихоокеанская плита субдуцирует со скоростью 8–9 см/год под Камчатку [De Mets et al., 1990; Geist, Scholl, 1994; Scholl, 2007]. Угол наклона субдуцирующей плиты 55°, но выполаживается до 35° на севере Камчатки, где вместе с Тихоокеанской плитой также субдуцирует Императорский подводный хребет [Gorbatov et al., 1997]. Согласно сейсмическим данным, глубина зоны Вадати – Беньофа возрастает вкрест простирания Камчатки от 60–100 км под вулканическим фронтом до более чем 300 км под южной частью задугового пояса ([Gorbatov et al., 1997]; см. гл. 1).

Четвертичный островодужный вулканизм на Камчатке представлен тремя поясами, параллельными Курило-Камчатскому желобу. Эти пояса последовательно смещены в северном направлении относительно друг друга при движении с востока на запад (см. рис. 2.3, а): Восточный вулканический фронт (ВВФ), грабеноподобная структура Центральной Камчатской депрессии (ЦКД) с Ключевской группой вулканов (КГВ), Срединный хребет (СХ) в тыловой части дуги. В историческое время активный вулканизм наблюдался только в ВВФ и в ЦКД. Однако позднелайстоценовый и голоценовый вулканизм присутствует во всех трех поясах [Пономарева и др., 2008], см. также раздел 2.1.

Современное тектоническое положение Камчатки сложилось в позднемiocен-плиоценовое время (3–6 млн лет назад), после продолжительной аккреции Кроноцкого террейна, которая происходила последовательно с юга

на север ([Селиверстов, 1998; Alexeiev et al., 2006; Lander, Shapiro, 2007]; см. гл. 1, рис. 1.7, 1.9) с последующим перемещением вулканического фронта примерно на 200 км к востоку, в его настоящее положение. В результате произошедших изменений СХ сменил свое тектоническое положение: если до аккреции террейнов он являлся вулканическим фронтом, то теперь стал тыловой частью вулканической дуги с соответствующими изменениями в геохимии и морфологии пород – от сильно обедненных платолав до обогащенных базальтов, формирующих стратовулканы и моногенные конусы [Volynets et al., 2010], см. раздел 2.1.

Северная граница погружающейся плиты не определена однозначно. Она маркируется северной границей голоценовой активности в ЦКД на вулкане Шивелуч [Волинец и др., 1997а; Yagodinski et al., 2001] и на Шишейском комплексе [Portnyagin et al., 2007а; Bryant et al., 2011]. В СХ голоценовый вулканизм простирается до конуса Тобельцен [Певзнер, 2006]. Согласно [Volynets et al., 2010], северная граница плиты проявляется как переходная зона шириной около 150 км, простирающаяся от Алеутского желоба через разлом Беринга до разлома Альфа.

Вулканы ЦКД расположены в районе тройного сочленения плит: Тихоокеанской, Берингийской и Охотоморской. Эти три плиты формируют две активные границы: конвергентную вдоль Курило-Камчатского желоба и трансформную вдоль Алеутско-Беринг-Альфа разломной зоны [Селиверстов, 1998], см. рис. 2.3, а. Для объяснения особенностей магматизма в этом регионе предлагались различные процессы: плавление края погружающейся плиты [Yagodinski et al., 2001], отсоединение и затопление в мантии фрагмента Тихоокеанской плиты [Levin et al., 2002], нагревание края Тихоокеанской плиты в мантийном клине благодаря уменьшению ее мощности под Императорским хребтом [Davaille, Lees, 2004], взаимодействие расплава погружающейся плиты с перидотитом верхней мантии и формирование низкотемпературных андезитовых расплавов [Portnyagin et al., 2007а], см. гл. 8.

Геофизические исследования [Балеста, 1991] обнаружили, что мощность коры вдоль Камчатского полуострова меняется от 20 до 42 км, возрастая с юга на север. Последние сейсмотомографические построения и другие современные геофизические исследования в целом подтверждают эти данные и показывают следующее: 1) средняя мощность коры под Камчаткой составляет не менее 30 км и 2) переходная зона кора – мантия под Камчаткой имеет ступенчатую природу [Iwasaki et al., 2013; Koulakov et al., 2013]; см. гл. 1. Глубинное сейсмическое зондирование определило, что мощность земной коры максимальна под КГВ и составляет 40–42 км [Балеста, 1991], уменьшаясь до 30 км под ВВФ и СХ. Увеличение мощности коры под КГВ связывается с мощной переходной зоной кора – мантия под активными вулканами [Там же] или промежуточной камерой расплава (гл. 7 и 8). Геофизические данные позволяют утверждать, что основная зона накопления магмы находится у основания коры или даже ниже переходной зоны кора – мантия (см. гл. 1.7, [Levin et al., 2014]). Глубина магматических очагов Камчатки варьирует в диапазоне от 25 до 50 км. В то же время коровые магматические очаги под некоторыми вулканами были определены на глубине от 1,5–2,0 (в том числе под Толбачинскими конусами) до 10–20 км [Балеста, 1991]. Наиболее полные последние обзоры по магматизму и сейсмичности Камчатки были опубликованы в 2007 и 2013 гг. соответственно [Eichelberger et al., 2007; Iwasaki et al., 2013; Koulakov et al., 2013].

Вулканы северной части ЦКД протягиваются от плейстоценового полуразрушенного вулкана Николка на юге до активного вулкана Шивелуч и моногенных конусов шишейского комплекса на севере, занимая общую площадь около 8500 км² [Мелекесцев и др., 1991], см. рис. 2.3, б. В пределах ЦКД находится 17 вулканов, три из которых расположены к северу (СЦКД) и 14 к югу (ЮЦКД) от р. Камчатки [Мелекесцев и др., 1974; Пономарева и др., 2008]. ЮЦКД включает КГВ и вулкан Николка, в то время как СЦКД объединяет вулканы Шивелуч, Харчинский, Заречный и конусы шишейского комплекса (см. рис. 2.3, б). Толбачинский вулканический массив расположен в юго-западной части КГВ.

В позднем плейстоцене основание под КГВ было разделено серией разломов на несколько тектонических блоков [Мелекесцев и др., 1974; Ермаков, 1977]. Центральный (к северу от Толбачинского массива) и юго-восточный (к востоку от Толбачинского массива) блоки являются тектонически стабильными, а юго-западный блок, подстилающий Толбачинский массив, опущен приблизительно на 500 м. Граница между центральным и юго-западным блоками проходит по р. Студеной, другие границы покрыты молодыми вулканическими образованиями [Мелекесцев и др., 1974]. Вулканы Ключевской, Камень и Безымянный, а также вулканический массив Плоские Сопки, состоящий из вулканов Плоский Дальний (синоним Ушковский) и Плоский Ближний (синоним Крестовский), расположены на крупном плато базальт-андезибазальтового состава высотой около 1500 м. Лавы плато обнажаются в долине р. Студеной и имеют центр излияния под массивом Плоские Сопки [Сирин, 1968; Флеров, Овсянников, 1991]. Юго-западная часть КГВ, включая Толбачинский вулканический массив, подстилается серией лавовых потоков базальт-андезитового ряда, которые обнажаются в долине р. Хапицы на высоте около 1000 м [Тимербаева, 1967].

Две протяженные зоны моногенного шлакового вулканизма и ассоциированных с ними лавовых полей протянулись через вулканические массивы Плоские Сопки и Толбачинский. Эти зоны являются наиболее молодыми рифтоподобными структурами в КГВ и в настоящее время полностью покрыты вулканическим материалом [Мелекесцев и др., 1991], см. рис. 2.3, б. Они также удивительно схожи; обе имеют 1) одинаковую ориентацию, 2) северную и южную ветви, 3) пересечение с вершинами массивов, 4) изменение ориентации с юго-юго-западного–северо-северо-восточного на юго-запад–северо-восток при пересечении вершин вулканических массивов, 5) большой объем продуктов извержения и 6) относительно молодой возраст (позднеплейстоценовый – голоценовый). Вероятно, моногенный вулканизм, развитый вдоль этих зон, связан с процессами растяжения внутри ЦКД. Тем не менее отсутствие прямых инструментальных измерений этого растяжения, а также пород, обладающих реальными внутриплитными геохимическими характеристиками, означает, что эта гипотеза требует дополнительных исследований (см. гл. 3 и 8).

2.2.2. Вулканы Ключевской группы

Ключевская группа вулканов включает четыре активных вулкана: Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик и Ушковский [Действующие вулканы Камчатки, 1991] и девять вулканов, рассматриваемых как потухшие, включая Камень, Крестовский, Средний, Острый Толбачик, Овальная Зими́на, Острая Зими́на, Большая Удина, Малая Удина и Горный Зуб (см. рис. 2.3, б). Благодаря постоянной активности действующих вулканов и уникальной тек-

тонической позиции район КГВ активно изучался с 1930 г. В настоящее время о КГВ опубликовано более тысячи работ, включая исследования в области петрологии [Флеров и др., 1984; Флеров и Овсянников, 1991; Хренов и др., 1991; Хубуная и др., 1993; Volynets, 1994; Kersting, Arculus, 1995; Волюнец и др., 1997a, 2000; Озеров и др., 1997; Хубуная, Соболев, 1998; Turner et al., 1998, 2007; Pineau et al., 1999; Dorendorf et al., 2000; Ozerov, 2000; Миронов и др., 2001; Чурикова и др., 2001; Churikova et al., 2001, 2007, 2013; Ishikawa et al., 2001; Yagodinski et al., 2001; Dosseto et al., 2003; Bindeman et al., 2004; Münker et al., 2004; Portnyagin et al., 2007a, 2007b; Auer et al., 2009; Горбач, Портнягин, 2011; Миронов, Портнягин, 2011; Almeev et al., 2013a, b; Gorbach et al., 2013; Dosseto, Turner, 2014], геофизики [Токарев, Зобин, 1970; Балеста, 1991; Gorelchik et al., 1997; Levin et al., 2002; Park et al., 2002; Горельчик и др., 2004; Davaille, Lees, 2004; Хубуная и др., 2007; Сенюков и др., 2009; Федотов и др., 2010, 2011; Thelen et al., 2010; Koulakov et al., 2011; Кугаенко и др., 2013; Grapenthin et al., 2013; Iwasaki et al., 2013; West, 2013], геохронологии [Брайцева и др., 1990; Calkins, 2004; Ponomareva et al., 2006, 2007; Пономарева и др., 2008; Певзнер и др., 2014] и другим смежным дисциплинам [Овсянников и др., 1985; Гирина, 1986; Белоусов, Белоусова, 1995, 1998; Муравьев и др., 2002; Мелекесцев, 2005; Гришин, Шляхов, 2009; Gilichinsky et al., 2010; Гордеев, Гирина, 2014]. Основная часть всех этих исследований сконцентрирована на изучении ныне действующих вулканов и продуктов их извержений.

Голоценовая активность внутри КГВ изучается тефрохронологическим методом [Braitseva et al., 1993], но для Камчатки этот метод ограничен возрастом отложений не старше 10–11 тыс. лет. Прямые изотопные определения возрастов пород КГВ изотопными методами немногочисленны и указывают на среднепозднеплейстоценовый период для нижних частей стратовулканов или их пьедесталов. Большинство оценок возрастов вулканов, которые соответствовали позднему плейстоцену, основаны на изучении морфологии построек и их стратиграфических взаимоотношениях с ледниковыми отложениями [Мелекесцев и др., 1971; Braitseva et al., 1995; Пономарева и др., 2008]. Все известные на сегодня возрасты пород КГВ обобщены и представлены на рис. 2.5.

Мощные платолавы, подстилающие КГВ, датируются возрастом 274 тыс. лет в юго-восточной части КГВ на р. Хапица и 262 тыс. лет в центральной части КГВ на р. Студеная ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$; [Calkins, 2004]). В этот же период, 188–366 тыс. лет назад (K/Ar, [Nishizawa et al., 2014]), благодаря усилению вулканической активности в хр. Кумроч к востоку от КГВ было сформировано 25 шлаковых и шлаколавовых конусов и несколько небольших вулканических тел [Успенский, Шапиро, 1984]. На основе взаимоотношений вулканических построек с ледниковыми отложениями [Мелекесцев и др., 1971; Braitseva et al., 1995] утверждается, что стратовулканы КГВ и СЦКД начали формироваться не позднее чем 30–50 тыс. лет назад. При этом наиболее старым, предположительно, является среднеплейстоценовый вулкан Горный Зуб. Эти данные сейчас подтверждаются $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом датирования для ранних лавовых потоков вулкана Шивелуч, возраст которых составил 82 тыс. лет [Певзнер и др., 2014]. Наиболее молодыми среди вулканов КГВ являются Ключевской и Безымянный, которые начали расти только 7 тыс. лет назад [Braitseva et al., 1995] и 5.5 тыс. лет назад [Брайцева и др., 1990] соответственно и которые до сих пор наиболее активны. Зона моногенных конусов в массиве Плоские Сопки, судя по всему, прекратила свою деятельность 10.2 тыс. лет назад [Ponomareva et al., 2007], и примерно в это же время [Брайцева и др., 1984a] начала

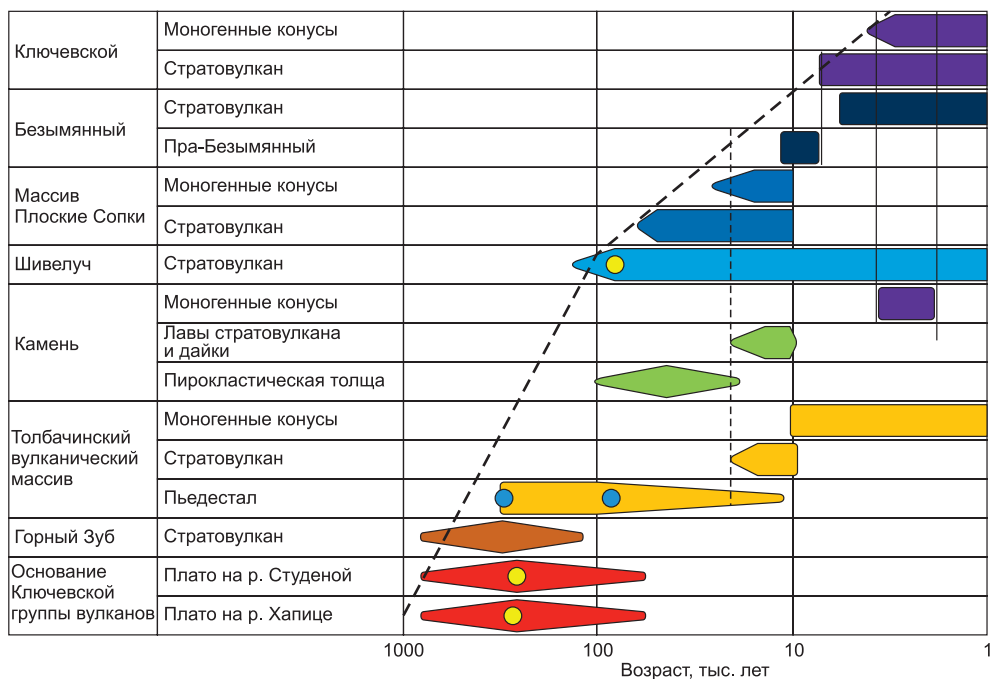


Рис. 2.5. Диаграмма распределения возрастов для вулканов КГВ и Шивелуч. Данные взяты из [Мелекесцев и др., 1970, 1974; Мелекесцев, 1980; Мелекесцев, Брайцева, 1984; Брайцева и др., 1990; Флеров, Овсянников, 1991; Braitseva et al., 1995; Calkins, 2004; Пономарева и др., 2008; Флеров, Мелекесцев, 2013; Певзнер и др., 2014; Churikova et al., 2015b].

Желтыми кружками отмечены данные, полученные ^{40}Ar - ^{39}Ar методом датирования, голубыми кружками – К-Аг методом датирования. Моногенные конусы влк. Камень принадлежат ареальной зоне Ключевского вулкана [Churikova et al., 2013]

работать вторая трещинная зона, формирующая обширные лавовые поля и шлаковые конусы в Толбачинском массиве, которая активна до сих пор (см. рис. 2.5).

2.2.3. ПЕТРОЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ ПОРОД

Геохимическое разнообразие вулканических пород ЦКД остается одним из наиболее интригующих вопросов магмогенерации [Portnyagin et al., 2007a], см. гл. 8. Большинство пород СЦКД и ЮЦКД относится к средне-К известково-щелочной серии, образцы которой могут быть найдены на каждом вулкане ЦКД. Кроме этого на вулканических массивах Плоские Сопки и Толбачинский, а также на малоизученном вулкане Николка встречаются довольно редкие для Камчатки лавы высоко-К серий: трахибазальты, трахиандезибазальты и трахиандезиты [Флеров и др., 1984; Churikova et al., 2001]. На вулкане Шивелуч высоко-К породы были известны как прослои тефры [Волынец и др., 1997a], и лишь недавно были обнаружены в коренном залегании [Горбач, Портнягин, 2011]. Эти породы сильно обогащены по щелочным элементам, фосфору и всем несовместимым элементам в сравнении с другими лавами ЦКД (рис. 2.6, 2.7), формируя высоко-К серию на рис. 2.6, а и ясный толеитовый тренд на диаграмме Миаширо (см. рис. 2.6, б). Положение пород Толбачинского массива среди пород ЦКД суммировано на рис. 2.6 и 2.7. Рис. 2.6, а показывает, что

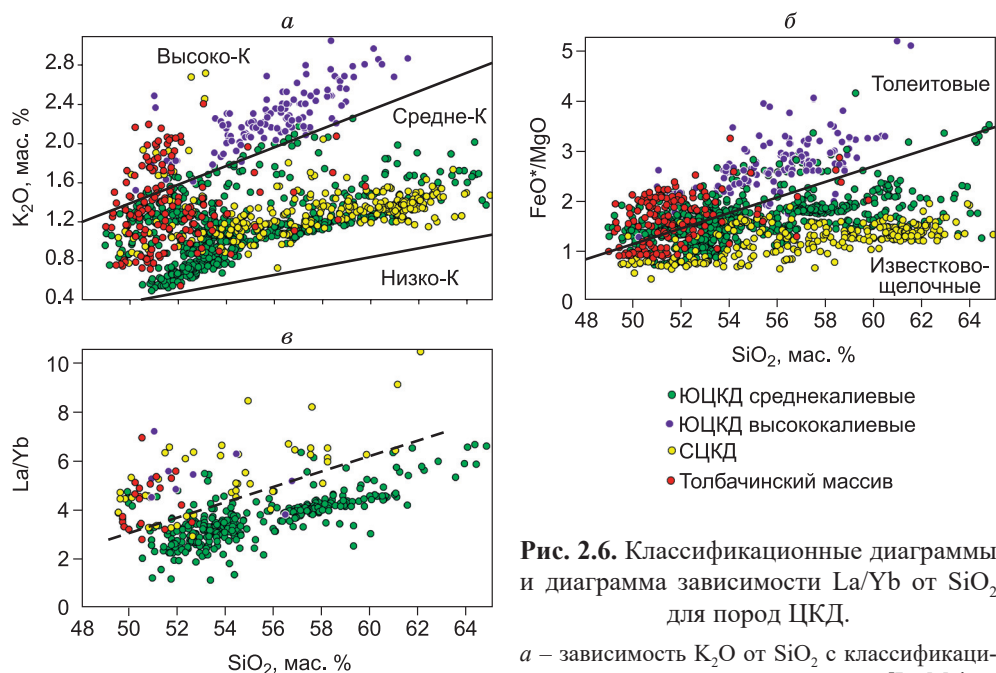


Рис. 2.6. Классификационные диаграммы и диаграмма зависимости La/Yb от SiO_2 для пород ЦКД.

a – зависимость K_2O от SiO_2 с классификационными линиями, нанесенными по [Le Maitre, 2002], показывающие поля низко-, средне- и высококальциевых островодужных лав; *б* – зависимость FeO/MgO от SiO_2 , показывающая поля толейитовых и известково-щелочных вулканических серий по [Miyashiro, 1974]; *в* – зависимость La/Yb от SiO_2 , средняя линия показана штриховой линией. Цвет символов подчеркивает разницу в географическом положении и в составе пород: желтыми кружками показаны породы вулканов СЦКД, фиолетовыми – высоко-К серии ЮЦКД, зелеными – средне-К серии ЮЦКД, красными – все лавы Толбачинского вулканического массива. FeO^* представляет общее содержание окислов железа в образце, представленное как FeO . Данные были взяты из [Эрлих, 1966; Ермаков, Важеевская, 1973; Ермаков, 1977; Чурикова, 1993; Portnyagin et al., 2007a; Иванов, 2008; Auer et al., 2009; Горбач, Портнягин, 2011; Bryant et al., 2011; Флеров, Мелекесцев, 2013; Almeev et al., 2013b; Churikova et al., 2013; Gorbach et al., 2013; Ponomareva et al., 2007; Turner et al., 2013; Kayzar et al., 2014]

на Толбачинском массиве представлены как средне-, так и высоко-К породы. Присутствие двух трендов пород в пределах ЦКД предполагает наличие различных родительских расплавов и/или различных процессов эволюции магмы. Породы внутри каждого тренда также сильно неоднородны по составу. Даже породы каждого вулкана КГВ могут быть охарактеризованы своими собственными петрологическими/геохимическими особенностями (см. [Dossato et al., 2003; Turner et al., 2007; Churikova et al., 2013]). Одним из основных вопросов для будущих петрологических и геохимических исследований в этом районе является вопрос о том, какие процессы и/или условия формирования и эволюции магмы могли привести к наблюдаемому разнообразию пород.

Ранее механизмы магмогенерации рассматривались безотносительно процессов субдукции [Fedotov, Markhinin, 1983; Федотов, 1984]. Но после 1990 г. было предложено несколько моделей, объясняющих разнообразие пород ЦКД и использующих понятие субдукции: плавление различных мантийных источников [Kersting, Arculus, 1994], различная степень плавления обедненного мантийного клина [Churikova et al., 2001], различные степени плавления и смешение расплавов, произведенных одним мантийным источником [Turner et al., 2007], различный состав флюида и в разной степени метаморфизованный мантийный клин [Churikova et al., 2001, 2007], добавка адакитового

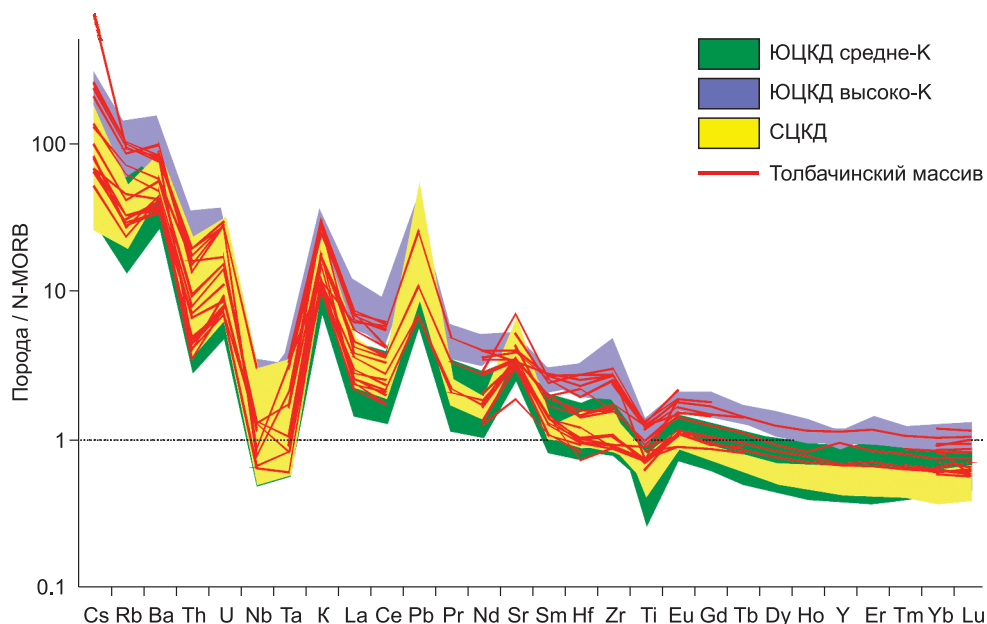


Рис. 2.7. Распределение микроэлементов, нормализованных на N-MORB, в различных сериях пород ЦКД.

Порядок несовместимых элементов взят из [Hofmann, 1988] с добавлением Cs и всех редкоземельных элементов. Значения N-MORB взяты из [Sun, McDonough, 1989]. Цвета полей соответствуют цветам точек на рис. 2.6. Данные по микроэлементам в породах Толбачинского вулканического массива показаны красными линиями, взяты из [Чурикова, 1993; Portnyagin et al., 2007a; Auer et al., 2009; Bryant et al., 2011; Almeev et al., 2013b; Churikova et al., 2013; Turner et al., 2013; Kayzar et al., 2014]

компонента в мантийный источник вулканов КГВ [Kepezhinskis et al., 1997; Yagodzhinski et al., 2001; Dosseto et al., 2003], полибарическое фракционирование расплавов при высоких давлениях из единого островодужного базальтового родительского расплава [Ariskin, 1999]. Все эти процессы в сочетании с активным подъемом магмы приводят к усиленной вулканической активности в этом регионе. Императорский хребет, погружающийся под КГВ вместе с Тихоокеанской плитой, также рассматривается как потенциальный источник больших количеств флюидов различных составов под регионом КГВ [Kepezhinskis et al., 1997; Pineau et al., 1999; Dorendorf et al., 2000; Ishikawa et al., 2001].

Результаты экспериментальных работ, в том числе [Kessel et al., 2005; Plank et al., 2009; van Keken et al., 2011; Ruscitto et al., 2012], и геодинамическое моделирование последних десяти лет показали, что субдукционные зоны являются более горячими, чем это предполагалось ранее, и что генерация суперкритической жидкости и частичное плавление погружающейся плиты возможны уже на глубинах 120–180 км. Это означает, что роль процессов дегидратации плиты и водных флюидов в образовании островодужных магм может быть меньше, а роль частичного плавления плиты (так называемого адакитового компонента) больше, чем считалось ранее (см. также гл. 1 и 8). Геохимическое моделирование подтверждает возможную добавку расплава плиты в источники всех вулканов ЦКД, включая Толбачинский массив [Portnyagin et al., 2007a, b; Portnyagin, Manea, 2008].

На большинстве петрохимических и геохимических диаграмм поля пород СЦКД и ЮЦКД частично перекрываются только в базальтовой области, до 54 % SiO_2 (напр., см. рис. 2.6, б, в). Исследование лав ЦКД обнаруживает систематическое обогащение с юга на север по Na_2O и обеднение по CaO при одинаковых значениях MgO и SiO_2 [Portnyagin et al., 2005]. Предыдущие исследователи объясняли эту разницу добавкой адакитового компонента в мантийные источники магм СЦКД на краю погружающейся плиты [Волынец и др., 1997а; Kepezhinskas et al., 1997; Yagodzhinski et al., 2001; Münker et al., 2004; Bryant et al., 2011]. Более поздние исследования показали, что вариации составов лав СЦКД могут объясняться также уменьшением температуры мантийного клина в направлении на север благодаря уменьшению угла наклона плиты и мощности мантийного клина [Portnyagi, Manea, 2008]. В этом продольном пересечении ЦКД Толбачинский массив занимает крайнее (за исключением вулкана Николка) южное положение с наиболее мощным и горячим мантийным клином.

2.2.4. СТРУКТУРА И МОРФОЛОГИЯ ОСНОВАНИЯ ТОЛБАЧИНСКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО МАССИВА

Поскольку природные разрезы континентальной коры внутри КГВ отсутствуют и обнажаются лишь местами в обрамлении ЦКД, информация о ее строении и структуре под КГВ разбросана по различным геологическим и геохимическим источникам. К таким источникам относятся: 1) изучение примкнувших к Камчатке террейнов [Konstantinovskaya, 2000; 2001; Соловьев и др., 2002], 2) исследования редких кварц-полевошпатовых и перидотитовых ксенолитов Ключевского [Пийп, 1956; Колосков, 1999], Безымянного [Щербачев, Плечов, 2010; Ionov et al., 2013; Kayzar et al., 2014], Шивелуча [Bryant et al., 2007] и Толбачинского [Shantser, 1983] вулканов, 3) геофизические исследования [Славина и др., 2012; Koulakov et al., 2013], 4) геохимические исследования лав и фенокритов [Dorendorf et al., 2000; Bindeman et al., 2004]. С их учетом построен схематический разрез на рис. 2.8.

Геологические данные показывают, что Толбачинский вулканический массив построен на ранней последовательности чередующихся лавовых потоков основного и среднего состава. Верхняя кора, подстилающая вулканические стратиграфические комплексы ЦКД, состоит из сложного набора аккреционного материала палеоостроводужных дуг (Ачайваям-Валагинский и Малкинский террейны), тектонизированного океанического основания (Ируней-Ватынские базальты) и меланжа [Konstantinovskaya, 2000, 2001]. Коровые ксенолиты были найдены в продуктах первой фазы извержения БТТИ 1975–1976 гг. (конусы I и II Северного прорыва БТТИ) и были идентифицированы как морские (основываясь на присутствии морских раковин моллюсков) и наземные осадочные породы, которые накапливались до формирования ЦКД, а также вулканические фрагменты, вероятно, связанные с деятельностью ЦКД [Shantser, 1983]. До настоящего времени не было обнаружено среднекоровых ксенолитов. Два, вероятно нижнекоровых, образца были найдены на вулкане Безымянный [Kayzar et al., 2014]. Минералогический состав ксенолитов соответствует гранулитовой фации (Орх–Срх–Pl), и, согласно двупироксеновому термометру, оценка температуры составляет ~930 °С. Сейсмологические исследования показывают, что граница Мохо под КГВ прослеживается на сравнительно широком интервале глубин (25–40 км), которая, возможно, является

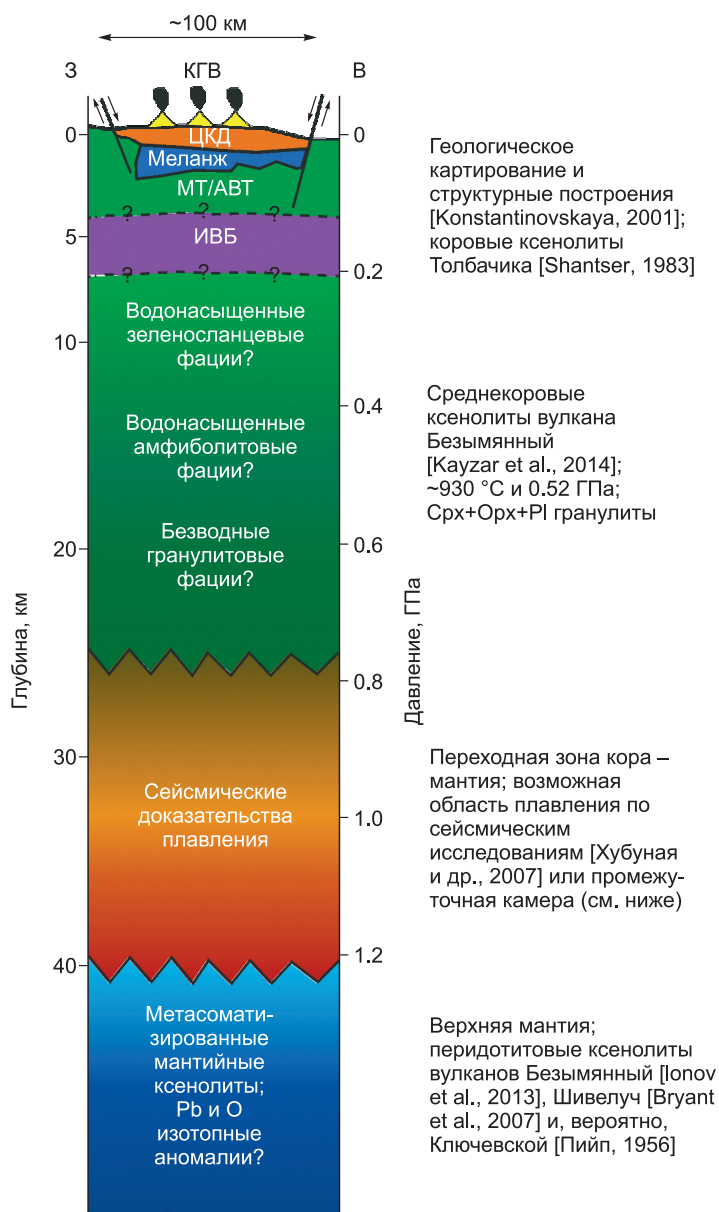


Рис. 2.8. Схематическое обобщение информации, характеризующей литосферу в районе КГВ.

Верхние коровые блоки включают относительное положение нескольких стратиграфических единиц: АВТ – Ачайваям-Валагинский террейн; МТ– Малкинский террейн; ИВБ – Ируней-Ватынские базальты, остатки океанической и палеоостроводужной литосферы; все три структурные единицы, как предполагается, были перемещены надвиговыми разломами поверх старого основания Камчатки [Konstantinovskaya, 2001]. Информация о коровых ксенолитах приведена по [Shantser, 1983] для Толбачика и [Kayzar et al., 2014] для Безымянного, о мантийных ксенолитах – по [Bryant et al., 2007] для Шивелуча [Щербаков, Плечов, 2010; Ionov et al., 2013] для Безымянного и [Пийп, 1956] для Ключевского вулканов. Согласно геофизическим исследованиям, нижнекоровые магматические очаги расположены на глубинах 25–40 км [Славина и др., 2012]. Характеристика литосферной мантии основана на геохимических исследованиях пород и их включений [Dorendorf et al., 2000; Bindeman et al., 2004; Хубуная и др., 2007]

местом, где мантийные расплавы находятся в течение долгого периода и подвержены процессам фракционирования ([Levin et al., 2014]; см. гл. 7). Предполагается, что редкие перидотитовые ксенолиты на вулканах Безымянный [Ionov et al., 2013] и Шивелуч [Мелекесцев и др., 1991; Bryant et al., 2007] были сформированы в верхней части метасоматизированной мантии. В двух образцах гарцбургитов вулкана Безымянный были определены жилы более позднего генезиса, состоящие из Crx, Amf, Sp и Fsp. Распределение микроэлементов в Орх из этих образцов указывает на реакцию с метасоматическими флюидами [Ionov et al., 2013]. Образцы из вулкана Шивелуч гораздо разнообразнее и включают различные перидотиты (лерцолиты и гарцбургиты) и пироксениты, некоторые из них содержат жилы, состоящие из Amf и Phl [Bryant et al., 2007]. Дунитовые ксенолиты из вулкана Шивелуч обнаруживают признаки реакции с андезибазальтовыми расплавами, проходящими через мантию, в то время как пироксениты, вероятно, имеют кумулятивное происхождение [Bryant et al., 2007]. Все перидотитовые ксенолиты обнаруживают высокую фугитивность кислорода: от $\Delta\text{FMQ}+1$ до $\Delta\text{FMQ}+3$ [Bryant et al., 2007; Ionov et al., 2013], что интерпретируется как их формирование в островной дуге на границе кора–мантия или как результат окисления во время взаимодействия с силикатными расплавами из субдуктируемой плиты. Однако, несмотря на то что вулкан Ключевской изверг самый большой объем высоко-Mg базальтов, до сих пор нет исследований, показывающих наличие в его продуктах ксенолитов мантийного происхождения. В то же время ранее были описаны некоторые Ol-Crx агрегаты [Пийп, 1956; Колосков, 1999]. Последние не прямые построения по составу литосферы базируются на изотопных анализах лав и их фенокристаллов, которые были использованы для определения области метасоматизированной мантии [Dorendorf et al., 2000; Bindeman et al., 2004]. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в фенокристаллах Ol и Орх Ключевского вулкана варьируют от 5.8 до 7.1 ‰, указывая на аномально высокие мантийные отметки, которые могли сформироваться благодаря плавлению верхней мантии, ранее метасоматизированной субдукционными флюидами. Все эти исследования подчеркивают сложность литосферы под КГВ, через которую проходят магмы Толбачинского массива. Сложность и малоизученность литосферы под КГВ вносят большие неопределенности в изменения геохимического сигнала расплава, поднимающегося к поверхности.

2.2.5. СТРАТОВУЛКАНЫ ОСТРЫЙ ТОЛБАЧИК И ПЛОСКИЙ ТОЛБАЧИК

Ранее считалось, что Толбачинский вулканический массив представлен одной частично разрушенной постройкой [Конради, 1925]. Позднее геологи пришли к выводу о наличии двух близкорасположенных построек, названных по их отличительной морфологии как Острый Толбачик и Плоский Толбачик [Кулаков, 1936], которые используются поныне.

Острый Толбачик имеет высоту 3672 м (рис. 2.9, а), но в прошлом, до того, как на его восточном склоне произошел крупный обвал [Флеров, Мелекесцев, 2013], его высота могла достигать 3800 м. Острый Толбачик в настоящее время считается потухшим и постоянно меняется благодаря многочисленным гравитационным обвалам разного масштаба [Влодавец, 1940; Пийп, 1956; Мелекесцев, Брайцева, 1984; Ponomareva et al., 2006]. Мощные пирокластические отложения можно наблюдать в эрозионном окне на его восточном склоне, которое обнажает внутренности постройки (рис. 2.9, б; см. раздел 2.3),

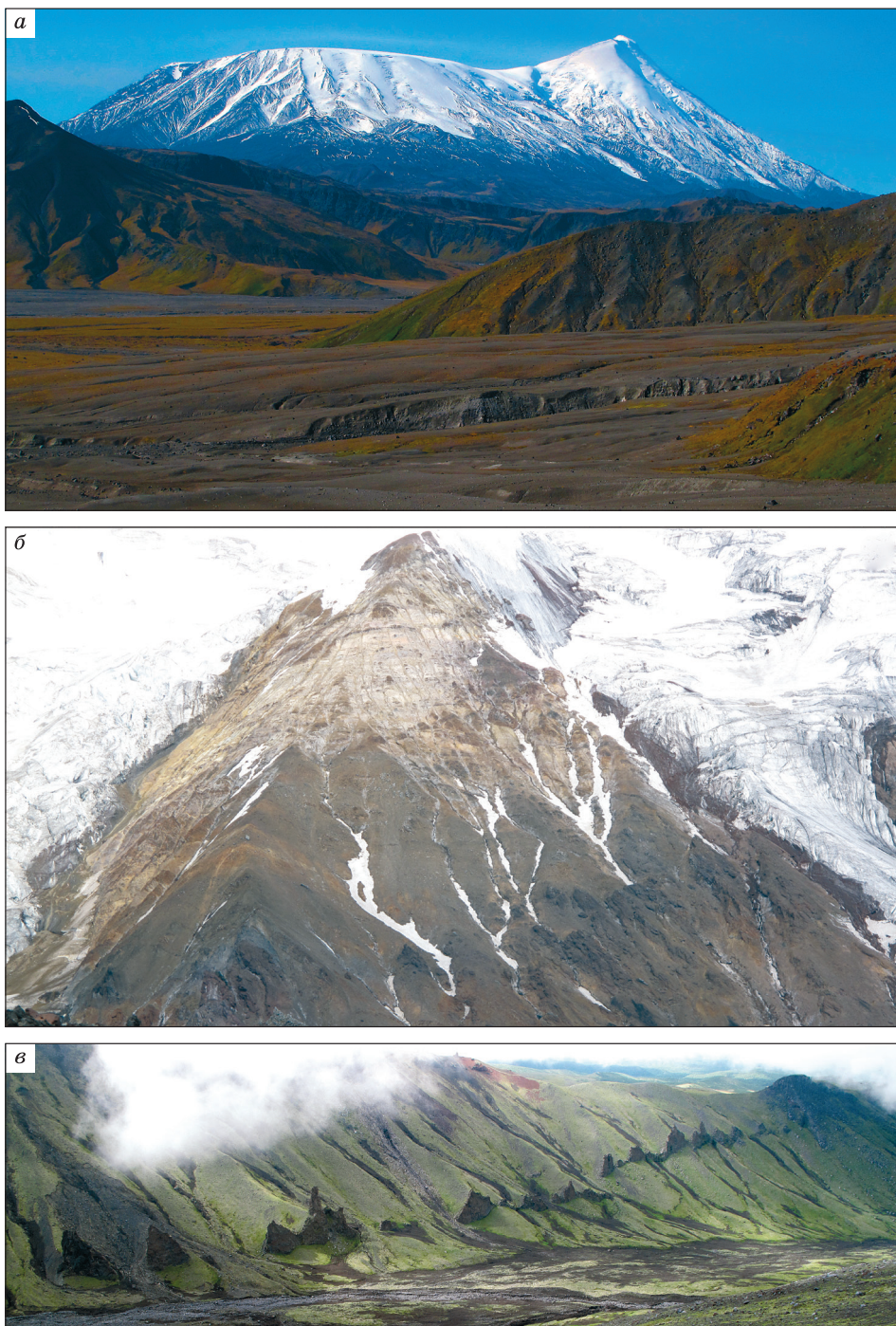


Рис. 2.9. Фотографии, показывающие объекты плейстоценового возраста в Толбачинском вулканическом массиве.

a – вид на Плоский Толбачик (слева) и Острый Толбачик (справа) со стороны вулкана Безымянный; видимый диаметр вершинной кальдеры вулкана Плоский Толбачик около 3 км; *б* – отложения пирокластического материала мощностью до 500 м на юго-восточном склоне вулкана Острый Толбачик; *в* – дайка длиной около 2 км с азимутом простирания 320° в Дачной долине на северо-западном склоне вулкана Острый Толбачик

в то время как его внешние склоны покрыты многочисленными лавовыми потоками. Большинство радиальных долин, окружающих вершину вулкана, частично заполнено ледниками, спускающимися с вершины постройки.

В отличие от Острого Толбачика, вулкан Плоский Толбачик высотой 3065 м в настоящее время активен, благодаря чему его вершинная часть часто посещается и, как результат, хорошо изучена (см. раздел 2.3). Постройка имеет плоскую вершину с кальдерой гавайского типа диаметром 3 км (так называемая большая кальдера, рис. 2.10, *а*), которая частично заполнена лавовыми потоками и льдом. В западной части кальдеры имеется вторая кальдера диаметром 1,8 км и глубиной 450 м – так называемая малая кальдера [Двигало и др., 1991], которая, в свою очередь, имеет кратер проседания, сформировавшийся в ходе извержения 1975–1976 гг. и практически полностью заполнивший вторую кальдеру (см. рис. 2.10, *а*). Геоморфологические построения предполагают, что ранее этот вулкан имел высоту около 3900 м и мог быть выше постройки Острого Толбачика [Флеров, Мелекесцев, 2013].

По поводу происхождения главной кальдеры Плоского Толбачика до сих пор нет единого мнения. Некоторые авторы считают ее кальдерой провального типа, образовавшейся благодаря удалению больших объемов материала из магматического очага [Пийп, 1954; Двигало и др., 1984], другие считают ее кальдерой взрывного типа [Ермаков, Важеевская, 1973]. Согласно третьей гипотезе, формирование кальдеры сопровождалось перемещением вершины вулкана Плоский Толбачик на расстояние 8 км к северо-западу от края кальдеры, где она и находится сейчас как гора Поворотная [Ronomareva et al., 2006]. Многочисленные радиальные и кольцевые дайки пересекают обе постройки по всем направлениям от их вершин (см. рис. 2.9, *в*). Детальная геолого-петрологическая карта Толбачинского вулканического массива была составлена в 70-е годы прошлого века [Ермаков, Важеевская, 1973; Ермаков, 1977]. В ходе этой работы было выявлено, что обе постройки стоят на едином пьедестале средне-позднеплейстоценового возраста, который представляет собой остатки щитового вулкана с углами падения склонов 3–5° и диаметром 22 км, обнажения которого мощностью 200–400 м имеются в северо-северо-западном секторе Толбачинского массива [Ермаков, Важеевская, 1973].

2.2.6. ЗОНА МОНОГЕННЫХ КОНУСОВ И ЛАВОВЫХ ПОЛЕЙ

Зона моногенных конусов и лавовых потоков Толбачинского вулканического массива состоит из двух рифтоподобных ветвей, разделенных 8-километровым промежутком, свободным от конусов, в районе вершины вулкана Плоский Толбачик: южная, находящаяся на Толбачинском долу, с азимутом 200°–205° и северная с азимутом 40°–45° (см. рис. 2.3, *б*, 2.11; [Churikova et al., 2015a, fig. 1, *е*]). Общая протяженность зоны составила около 60–70 км при ширине 13–15 км, в пределах которой извергались многочисленные шлаковые и шлаколавовые конусы. Тем не менее 80 % шлаковых конусов сосредоточены внутри более узкой зоны шириной 3–4 км, формируя вулканическую гряду (см. рис. 2.10, *б*). Эта центральная часть имеет погребенную грабенообразную структуру с глубиной 0.5–1.5 км [Балеста, 1991]. Наиболее крупные шлаковые конусы расположены в этой зоне, включая конусы Клешня, Песчаные Горки, Алайд, высота 1004, Высокая, Лагерный, Красный (см. рис. 2.11, *а*), и три конуса Северного прорыва БТТИ 1975–1976 гг. Высоты шлаковых конусов меняются в пределах 50–300 м. На основании распределения конусов в



Рис. 2.10. Фотографии, показывающие объекты голоценового возраста в Толбачинском вулканическом массиве.

а – вид на северо-запад на вершинный кратер вулкана Плоский Толбачик с диаметром 1600 м и глубиной около 500 м. Острый Толбачик виден слева. Снято 3 августа 2012 г.; *б* – цепь шлаколавовых конусов, протягивающаяся от вулкана Плоский Толбачик в юго-юго-западном направлении с азимутом 200–205° на расстояние около 40 км; *в* – северный склон моногенного шлакового конуса Красный с хорошо видимым коротким лавовым потоком. Красное пятнышко справа от потока – стоящий человек. Снято 31 июля 2012 г. Конус практически полностью разрушен извержением 2012–2013 гг.

этой зоне можно выделить несколько субпараллельных или кулисообразных трещин. Вся зона, включая северную и южную ветви, покрыта переслаивающимися лавовыми полями с общей площадью 985 км² [Флеров, Мелекесцев, 2013]. В ходе извержения 1975–1976 гг. поверхность этой зоны была частично заполнена большим объемом перемещенной по воздуху тефры.

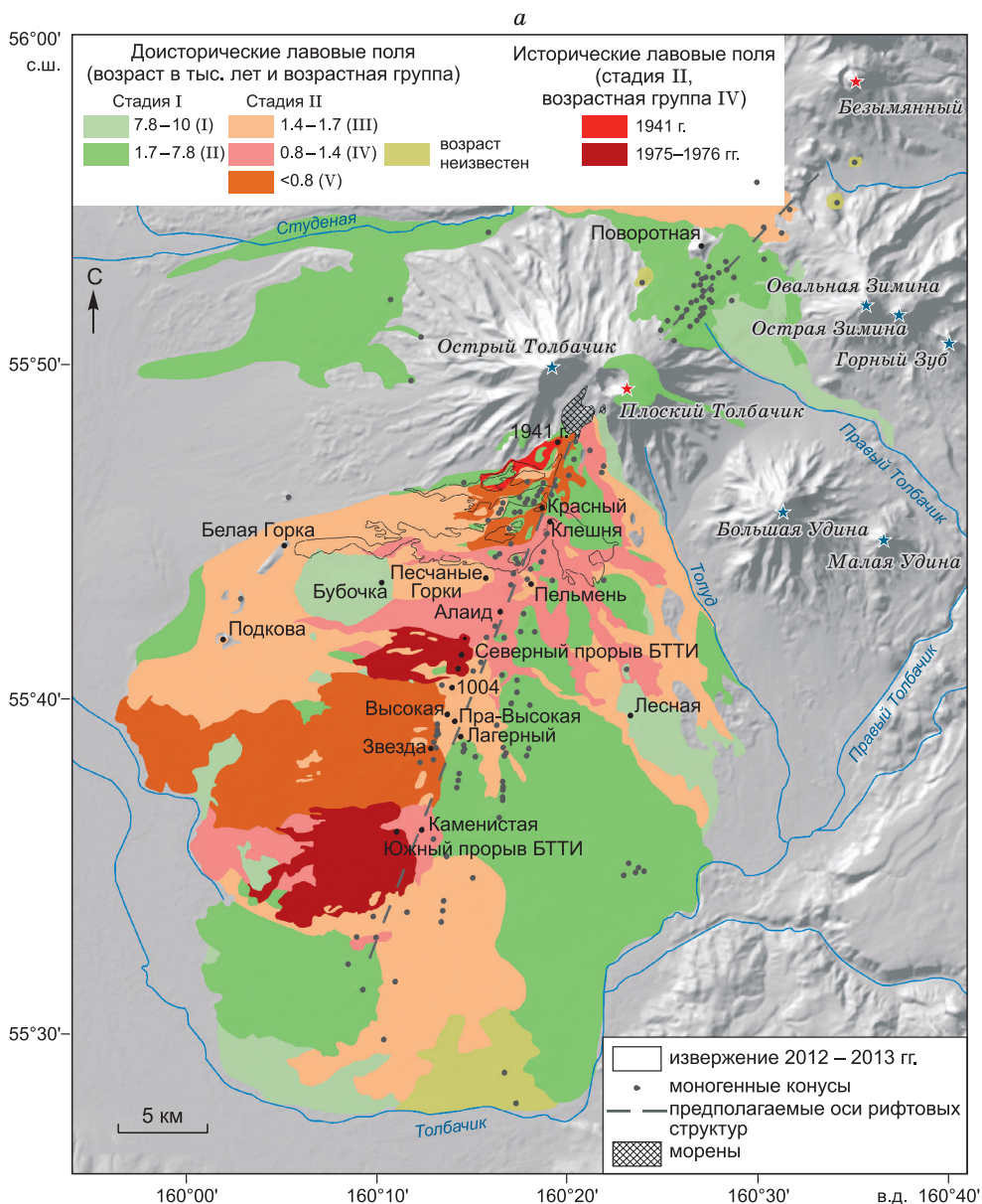
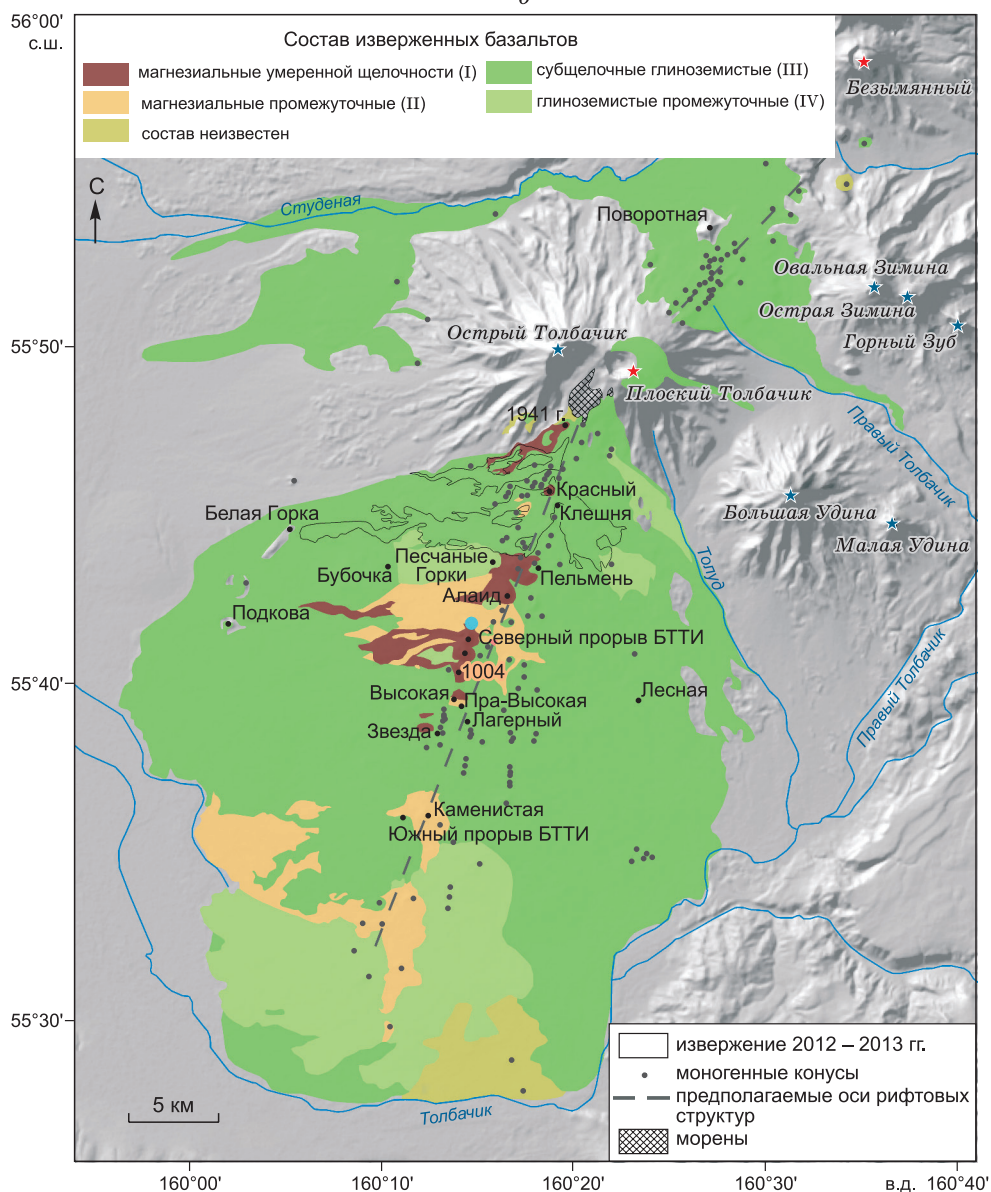


Рис. 2.11. Схемы вулканических образований Толбачинского дола, показывающие
a – карта из [Брайцева и др., 1984а], построенная на основе тейхронологического датирования, которые объединены в две стадии: стадия I (возрастные группы I и II) и стадия II (возрастные маркирующие региональных слоев тейфы (см. табл. 2.1, 2.2). Калиброванные возрасты окру-
возраст; *б* – карта из [Флеров и др., 1984], показывающая составы изверженных пород. Породы

В настоящее время северная ветвь зоны не считается активной, последние извержения здесь концентрировались вдоль трещинной зоны длиной 3–4 км и шириной 2 км [Брайцева и др., 1984а]. Южная ветвь более обширна и содержит несколько десятков конусов. Все исторические извержения моногенных конусов (1941, 1975–1976 и 2012–2013 гг.) происходили именно здесь. В то время как большинство конусов, таких как Клешня, Песчаные Горки, Высокая, конусы Северного прорыва БТТИ, сросшиеся, встречаются и единичные

б



возрасты шлаковых конусов и лавовых потоков (а) и состав изверженных пород (б).

ния вулканических образований (см. табл. 2.1). Было выделено шесть возрастных групп пород, группы III–VI). Возрасты групп позднее были пересмотрены на основе новых возрастных оценок лены до сотен лет и приведены в тыс. лет, для исторических извержений указан календарный были разделены на четыре химических типа, обозначенных римскими цифрами

постройки с хорошо выраженным кратером, такие как Алаид, высота 1004, конус 1941 г., Южный прорыв, Красный (см. рис. 2.10). Большинство конусов сопровождается лавовыми потоками, однако не всегда возможно определить принадлежность потока к какому-то конусу. Иногда конусы разных возрастов (например, Песчаные Горки, Высокая) расположены в единой цепочке конусов. В этом случае более ранние конусы часто разрушены и перекрыты новыми лавовыми потоками более поздних извержений. Например, конус

Красный (см. рис. 2.10) практически полностью разрушен продуктами извержения прорыва Набоко 2012–2013 гг. Более старые конусы также имеются и в южной ветви Толбачинской зоны моногенных конусов. Они обычно сильно эродированы и только частично обнажены, поскольку со временем они были перекрыты более молодыми лавами и толстым слоем тефры. Обычно кратеры полностью разрушены и не идентифицируются. Характерными особенностями Толбачинского дола являются обширные поля, покрытые мощным, более 5 м, слоем тефры, а также а-а и пахоэ-хоэ лавами [Брайцева и др., 1984а].

2.2.7. ИСТОРИЯ ИЗВЕРЖЕНИЙ ТОЛБАЧИНСКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО МАССИВА

ПЛЕЙСТОЦЕН

Определений возрастов плейстоценовых пород в ЦКД крайне мало (см. рис. 2.5). Наиболее древние лавы обнажены в восточной и центральной частях КГВ и датированы инструментальными изотопными методами 262–274 тыс. лет ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ [Calkins, 2004]) и 306 тыс. лет [Churikova et al., 2015b]. Такой узкий интервал возрастов пород в разных частях КГВ предполагает единое основание для всех вулканов КГВ. Единственное определение породы из пьедестала Толбачинского массива дало возраст 86 тыс. лет (К-Ar [Churikova et al., 2015b]). Другие возрастные оценки пород вулканов КГВ основаны на их морфологии и стратиграфических взаимоотношениях их построек с ледниковыми отложениями [Мелекесцев и др., 1971; Braitseva et al., 1995]. Оцененные таким образом возрасты стратовулканов Острый и Плоский Толбачик составили 15–20 тыс. лет [Мелекесцев и др., 1970; Флеров, Мелекесцев, 2013]. Некоторые исследователи считают, что постройка Острый Толбачик старше постройки Плоского Толбачика [Пийп, 1954; Флеров, Мелекесцев, 2013]. Другие предполагают субодновременный рост обоих стратовулканов, основываясь на том, что лавовые потоки обеих построек переслаиваются [Кулаков, 1936; Ермаков, Важеевская, 1973].

Несколько плейстоценовых шлаковых конусов, таких как Подкова, Белая Горка, Красная Горка, частично разрушенных и окруженных голоценовыми лавами, расположены на западном окончании Толбачинского дола. Эти конусы, возможно, относятся к массиву Плоские Сопки [Мелекесцев и др., 1974].

ГОЛОЦЕН

Вулканическая активность Толбачинской зоны моногенных конусов началась в раннем голоцене [Брайцева и др., 1984а]. Формирование крупной кальдеры на вершине вулкана Плоский Толбачик может быть также связано с началом деятельности этой зоны [Там же]. Субщелочные базальты, по составу похожие на лавы зоны моногенных конусов, сформировали внутрикальдерные отложения мощностью 250–300 м с объемом 2.5 км^3 [Там же]. В течение голоцена из вершинного кратера происходили многочисленные извержения, которые иногда сопровождались активностью в зоне моногенных конусов (например, извержение 1941 г. [Пийп, 1946]).

История извержений внутри зоны была полностью восстановлена благодаря детальным тефрохронологическим исследованиям и радиоуглеродному методу датирования [Брайцева и др., 1984а]. В зоне конусов выявлено более 60 голоценовых извержений (см. рис. 2.11, а).

Продукты начальной стадии активности в Толбачинской зоне моногенных конусов представлены шлакообразной тефрой с примерным возрастом

10–11 тыс. лет [Там же]. Никакие лавовые потоки или центры извержений не сохранились и, вероятно, были захоронены более молодыми отложениями. Все лавы Толбачинской зоны моногенных конусов были разделены на шесть возрастных групп [Там же] и датированы с помощью пяти маркирующих горизонтов тефры, причем все пять горизонтов первоначально были отнесены к вулкану Шивелуч [Брайцева и др., 1984а, табл. V.2]. Дальнейшее изучение этих маркирующих тефровых горизонтов подтвердило принадлежность только трех из них вулкану Шивелуч (SH_2 , SH_3 и SH_5). Слои же SH_4 и SH_6 оказались тефрами вулканов Ксудач и Хангар соответственно и были переименованы в KS_1 и KHG (см. табл. 2.1 и 2.2; [Braitseva et al., 1997]). Возрасты всех пяти маркирующих горизонтов были уточнены с использованием многочисленных определений ^{14}C [Braitseva et al., 1997; Базанова, Певзнер, 2001; Ponomareva et al., 2007, 2015]. Старые и новые названия и уточненные возрасты этих маркирующих горизонтов приведены в табл. 2.2 и 2.3. Мы оставили все шесть групп, выделенных ранее [Брайцева и др., 1984а].

Наиболее старые конусы Толбачинской зоны моногенных конусов (группа I) с возрастом 7.8–10.0 тыс. лет найдены вблизи границ Толбачинского лавового поля (см. рис. 2.11; [Churikova et al., 2015a, fig. 1, e]). Они перекрыты почвенно-пирокластическими отложениями мощностью 3–4 м, нижние части которых содержат маркирующий слой KHG или стратиграфически залегают близко с ним. Топографически различимы только два из них – Бубочка и Лесная. Другие центры и большинство лавовых потоков этой группы покрыты более молодыми лавами и открываются только в редких разрозненных «окнах». Группа II представлена только лавовыми потоками возраста 1.7–7.8 тыс. лет, которые перекрываются тефрами SH_5 и/или KS_1 . Эти лавы хорошо выражены в рельефе вдоль Толбачинской зоны моногенного вулканизма (см. рис. 2.11, a).

Группы I и II объединены в стадию I, в которую большей частью извергались лавы высококальциевых базальтов (табл. 2.3). Во время стадии I были активны обе ветви Толбачинской моногенной зоны (см. рис. 2.11, a), но ско-

Таблица 2.3

Возрастные группы вулканических образований Толбачинского дола

Стадия	Возрастная группа	Возраст	Состав пород	Стратиграфическое положение
II	VI (историческая)	2012–2013	Базальт типа III и андезибазальт	Над современной почвой
		1975–1976	Базальт типов I и III	
		1941	Базальт типа III	
	V	<0.8	Базальт типов I и III	Над SH_2
	IV	0.8–1.4	Базальт типов I–III	Между SH_2 и SH_3
I	III	1.4–1.7	Базальт типов I–IV	Между SH_3 и KS_1
	IIb	1.7–1.9	Базальт типа III	Между KS_1 и SH_5
	IIa	1.9–7.8	Базальт типов III–IV	Между SH_5 и KHG
	I	7.8–10.0	Базальт типа III	Под KHG

Примечание. Таблица из работы [Брайцева и др., 1984а], обновленная для настоящей главы. Стадии и возрастные группы по [Брайцева и др., 1981, 1984а]. Приведены калиброванные ^{14}C возрасты, округленные до ближайших ста лет, и календарные возрасты для исторических извержений. Типы пород по [Флеров и др., 1984; Волюнец и др., 2013]. Возрасты маркирующих прослоев тефры приведены по [Ponomareva et al., 2015]. Обозначения маркирующих прослоев тефры по [Braitseva et al., 1997].

рость производства магмы не была высокой, 17×10^6 т в год [Брайцева и др., 1984а]. Большинство извержений того времени было сосредоточено вдоль зоны шириной 13–15 км, но в конце стадии I ширина зоны стала уменьшаться.

Начало стадии II, которое произошло 1.7 тыс. лет назад, ознаменовалось первыми извержениями высоко-Mg средне-K базальтов и другими драматическими изменениями в характере вулканизма Толбачинской зоны (см. рис. 2.11, б). Во время стадии II, когда вулканическая активность в основном происходила в южной ветви зоны, скорость производства магмы увеличилась до 25×10^6 т в год, при этом изливались как средне-, так и высоко-K лавы. В это время начинают формироваться крупные постройки, большинство событий концентрируется внутри узкой трещинной зоны шириной 3–4 км.

В пределах этой стадии были выделены четыре группы (III–VI). В период 1.4–1.7 тыс. лет (группа III) сформировалось несколько крупных конусов и ассоциированных с ними лавовых полей: высота 1004, Пра-Высокая, Лагерный и Пельмень. Эти лавы перекрыты маркирующим горизонтом SH_3 и подстилаются тефрами KS_1 (см. табл. 2.2, 2.3). В следующий возрастной период, который длился между 0.8 и 1.4 тыс. лет назад, выросли сопки Каменистая, Алаид, Песчаные Горки и Клешня. Лавы этой группы стратиграфически лежат между маркирующими тефрами SH_2 и SH_3 . Конусы Высокая, Красный (см. рис. 2.10, а) и Звезда и их лавовые потоки относятся к возрастной группе V, которая моложе, чем маркирующий слой SH_2 , т.е. моложе 0.8 тыс. лет. Одновременное извержение конуса Звезда и вершинное извержение вулкана Плоский Толбачик, возможно, наблюдал Степан Крашенинников в 1739–1740 гг. [Крашенинников, 1755; Брайцева и др., 1984а].

ИСТОРИЧЕСКИЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ

Возрастная группа VI объединяет исторические извержения, в основном представленные многократными эпизодами эксплозивной активности кратера вулкана Плоский Толбачик (в том числе 1740, 1769, 1788–1790, 1793, 1904, 1931, 1937 гг.), два из которых – 1740 и 1904 гг., сопровождалась лавовыми потоками ([Влодавец, Пийп, 1957]; см. раздел 2.3). Систематическое изучение вершины вулкана Плоский Толбачик началось только с созданием Камчатской вулканологической станции в 1935 г. ([Кулаков, 1936]; см. рис. 2.4). С этого времени все извержения наблюдались исследовательскими группами, которые поднимались на вершину вулкана после каждого эпизода активности и детально описывали изменения формы кратера и фумарольную активность [Влодавец, 1937, 1940; Пийп, 1946, 1954; Попков, 1946; Меняйлов, 1953; Заваицкий и др., 1954; Сирин, Фарберов, 1963; Мархинин, 1964; Пронин и др., 1970; Кирсанов, Пономарев, 1974]. Характерной особенностью вершинных извержений являлось периодическое появление лавового озера внутри кратера и изменение его уровня. В течение 1936–1977 гг. кратер вулкана увеличился в 4–6 раз и объем провала возрос с 0.01 до 0.347 км^3 [Двигало и др., 1984, 1991]. Помимо активности в вершинном кратере вулкана, в историческое время до 2012 г. произошло два извержения в южной ветви зоны моноконусов, в 1941 г. и в 1975–1976 гг. Оба извержения сопровождалась вершинной активностью и были детально изучены. Извержение 1941 г. происходило на высоте 1900 м в 4.5 км от кальдеры Плоского Толбачика и было коротким (всего одна неделя с 7 по 14 мая), но очень интенсивным, извергнув на поверхность 0.1 км^3 вулканического материала, 70 % которого составляла тефра размерности от песка до лапиллей [Брайцева и др., 1984а]. Этому извер-

жению предшествовала 18-месячная активность вершинного кратера, которая характеризовалась фумарольной деятельностью, взрывными извержениями и появлением лавового озера на дне кратера [Пийп, 1946]. Образование конуса и лавового потока длиной 5 км было последним событием длительного периода активности кратера. Извержение наблюдалось из окружающих деревень (30–50 км от извержения) и было детально описано Б.И. Пийпом [Пийп, 1946].

Извержение 1975–1976 гг., продолжавшееся 17 месяцев, постоянно наблюдалось и детально изучалось сотрудниками Института вулканологии под руководством С.А. Федотова. По результатам, полученным в ходе извержения, опубликовано огромное количество статей (см. рис. 2.4), в том числе коллективные монографии [Fedotov, Markhinin, 1983; Федотов, 1984]. Это было самым крупным историческим извержением Курило-Камчатской дуги и одним из шести крупнейших исторических трещинных извержений в мире. Оно поставило на поверхность 2.17 км^3 материала (1.19 км^3 лавы, 0.71 км^3 тефры, 0.27 км^3 материала конусов) общей массой $3.81 \cdot 10^6 \text{ т}$ [Брайцева и др., 1984а], покрыв продуктами площадь около 1000 км^2 [Федотов и др., 1991].

Извержение имело два центра – Северный прорыв, состоящий из трех конусов, и Южный прорыв с одним конусом, которые извергали лавы различного состава (см. рис. 2.11, б). Формирование каждого конуса начиналось с открытия трещины или серии трещин, из которых извергался тефровый материал, создавая «огненную стену», после чего активность локализовалась в отдельные центры и начинали формироваться конусы и лавовые потоки. Извержение началось с Северного прорыва 6 июля 1975 г. вдоль трещины длиной 250–300 м, образованной на высоте 880 м в 18 км к юго-юго-западу от вершины вулкана Плоский Толбачик. Извержение быстро локализовалось в конус 1, извергающий пирокластический материал на высоту более 6 км. Так продолжалось до 27 июля, после чего начались лавовые излияния, а 9 августа активность конуса 1 закончилась. Двенадцатью часами позже вторая трещина начала открываться к северо-северо-востоку от конуса 1, что привело к образованию конуса 2. Извержение конуса 2 носило эффузивный характер и произвело мощный лавовый поток длиной 5 км и шириной 1.5 км с мощностью на фронте потока до 80 м [Действующие вулканы Камчатки, 1991]. 16–17 августа начался рост конуса 3 к северу от конуса 2, а 21–22 августа – конуса 4 к западу от конуса 3. Конус 4 позднее был полностью захоронен вулканическим материалом. 25 августа вся вулканическая активность сконцентрировалась на конусе 2. 15 сентября извержение Северного прорыва, продолжавшееся 72 дня, прекратилось. Лавы этого извержения покрыли площадь 8.86 км^2 , а объем лавы составил 0.223 км^3 [Fedotov, Markhinin, 1983; Федотов, 1984; Федотов и др., 1991].

Два дня спустя, 17 сентября, открытием трещины Южного прорыва длиной 600 м приблизительно в 28 км к юго-юго-западу от вершины вулкана Плоский Толбачик на высоте 380 м началась вторая фаза извержения. Это извержение продолжалось 450 дней до 10 декабря 1976 г. Извержение Южного прорыва имело более эффузивный характер в сравнении с Северным прорывом и сформировало только один шлаковый конус. Лавы этого извержения покрыли площадь 35.9 км^2 с объемом лавы $\sim 1 \text{ км}^3$. Извержение Южного прорыва по типу было близко Гавайскому с истечением жидкой лавы.

До извержения 1975–1976 гг. активный кратер вулкана Плоский Толбачик, расположенный в западной части малой кальдеры, имел диаметр 350–400 м при глубине 150–200 м. Извержение 1975–1976 гг. сопровождалось слабой вулканической активностью вершины вулкана Плоский Толбачик,

включая небольшие эксплозии, которые начались на вершине за 8 дней до открытия первой трещины; также несколько эксплозивных выбросов произошло в течение первых трех месяцев извержения. В начале этого извержения на вершине были зафиксированы масштабные проседания и обвалы, сопровождаемые облаками пепла. Вторая мощная серия обвалов была связана с началом работы Южного прорыва. В результате плавления льда вершинного ледника в ходе извержения на дне кратера образовалось озеро с объемом воды около 0.005 км³. Размер нового кратера после извержения составил 1615×1220 м при глубине 404 м. Небольшое озеро на дне кратера существовало еще непродолжительное время после извержения [Двигало и др., 1984, 1991].

2.2.8. ПЕТРОЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ ТОЛБАЧИНСКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО МАССИВА

ПЕТРОГРАФИЯ

Пьедестал Толбачинского вулканического массива состоит из двух пачек пород. В нижней части преобладают клинопироксеновые, так называемые авгитофировые, и Ol-Px лавы, в верхних частях разрезов присутствуют плагиоклазовые базальты и андезибазальты [Ермаков, Важеевская, 1973; Ермаков, 1977].

Породы стратовулканов Плоский Толбачик и Острый Толбачик петрографически довольно разнообразны. Породы нижних частей стратовулканов представлены Срх-Орх и Срх-Орх-Pl базальтами, но вверх по разрезу количество обогащенных Pl базальтов и андезибазальтов растет. В обеих постройках редко встречаются двупироксеновые и роговообманковые лавы [Пийп, 1956; Ермаков, 1977]. Стратовулканы пересечены многочисленными дайками, представленными Rx-Pl андезибазальтами, иногда содержащими Nb или Ol, базальтами с мегакристаллами Pl и/или Срх, а также Ol-Pl и пироксеновыми базальтами. Некоторые дайки на северо-западном склоне вулкана Острый Толбачик обогащены до 30 % Ol и Rx, где фенокристаллы обоих минералов достигают 1.5 см. Орх и Mt встречаются в небольших количествах во всех породах. Текстуры пород в основном мелкозернистые, порфировые и субафировые. Последовательность кристаллизации может меняться. Основная масса, содержащая микролиты, имеет интерсертальную текстуру и может содержать редкие кристаллы пижонита и кварца [Флеров, Мелекесцев, 2013].

Породы конусов до извержения 2012–2013 гг. были представлены исключительно базальтами. В работе [Флеров и др., 1984] все породы Толбачинской зоны разделялись на четыре типа: высоко-Mg базальты, субщелочные высоко-Al трахибазальты и два промежуточных типа. Петрографически они также различаются от высоко-Mg, Ol-Px и субафировых базальтов до субщелочных мегаплагиофировых с непрерывными переходами между ними. Субафировые лавы имеют тонкокристаллическую основную массу с редкими фенокристаллами Ol, Срх и иногда Pl размером 0.2–0.8 мм. Текстуры меняются от плотных до пузырчатых. Основные массы состоят из тех же минералов, но с преобладанием Pl, Sp, Mt и вулканического стекла разного цвета [Там же].

Мегаплагиофировые базальты, в которых вкрапленники Pl достигают 2 см, являются характерной чертой Толбачинской зоны моногенных конусов. Они преобладают в северной ее части, заполняют кратер вулкана Плоский Толбачик и широко развиты в южной части зоны. Они, как правило, пористые и состоят в основном из Ol, Срх и Pl, причем Pl преобладает (до 20 %). Ol и Срх обычно имеют размеры 1–2 мм и присутствуют в количествах менее 5 %

от объема породы. Ортопироксен обычно в этих породах отсутствует или его количество очень мало (менее 1 %). Основная масса часто витрофирная и содержит больше нераскристаллизованного вулканического стекла, чем все другие породы Толбачинского массива. Эти лавы характеризуются широкими вариациями пористости, которая меняется от 10 до 55 %. Кроме того, вблизи высоко-К конусов Толбачинского массива в лавах и вулканических бомбах могут быть найдены Pl фенокристаллы и, как отдельные плагиоклазовые лапилли, сростки крупных кристаллов Pl сферической формы до 4 см в диаметре. Такие лапилли часты также в зоне вершинного кратера [Кирсанов, Пономарев, 1974; Флеров и др., 1984].

МИНЕРАЛОГИЯ ИЗВЕРЖЕННЫХ И ПОСТИЗВЕРЖЕННЫХ ПРОДУКТОВ

Основными породообразующими минералами пород Толбачинского массива являются Ol, Cpx Pl, Ti-Mt. Ортопироксен присутствует в породах стратовулкана, но крайне редок в базальтах моногенных конусов. Минералы в базальтах и андезибазальтах стратовулканов Плоский Толбачик и Острый Толбачик близки по химическому составу: оливин меняется в диапазоне Fo₇₉₋₅₈ (CaO = 0.1–0.25 %), плагиоклаз – в диапазонах An₉₂₋₄₈ и Or_{0.4-2.5}; клинопироксен представлен диопсид-авгитом с магнезиальностью Mg[#]₈₇₋₆₅, а Sp – титаномагнетитом, ортопироксен представлен бронзит-гиперстеном с Mg[#]₇₇₋₆₆ табл. 2.4 [Флеров и др., 2015].

Большинство минералогических данных для базальтов моногенных конусов получено при исследовании образцов извержения 1975–1976 гг. Высоко-Mg базальты конусов, как и промежуточные типы пород, имеют более примитивный состав вкрапленников: Ol варьирует в интервале Fo₈₅₋₉₀

Таблица 2.4
Состав минералов и *P-T*-условия кристаллизации основных типов пород на Толбачинском вулканическом массиве

Комплекс	Моногенные конусы			Стратовулкан
	Высоко-Mg средне-K			
Тип породы	Начало кристаллизации	Конец кристаллизации	Высоко-K трахибазальт	Средне-K известково-щелочной
Минеральный парагенезис	Fo ₉₀₋₈₅ +Cpx ₈₈₋₈₀ ± ±An ₇₅₋₆₅ +Sp ₁ -Sp ₂	Fo ₈₅ +Cpx ₇₉₋₈₀ ± ±An ₆₅₋₆₂ +Sp ₂ -Sp ₄	Fo ₇₆₋₆₉ +Cpx ₈₂₋₆₆ + +An ₈₀₋₄₄ +Sp ₃	Fo ₇₉₋₅₈ +Cpx ₈₇₋₆₅ +An ₉₂₋₇₈ + +Sp ₄ +Opx ₇₇₋₆₆
T _{крист} , °C	1260–1200	1195–1165	1190–1140	1070–1200
P _{крист} , кбар	4–7	1	3–1	2.6–3.0
Фугитивность, O ₂	10 ⁻⁶ –10 ^{-6.5}	10 ^{-5.5} –10 ⁻⁶	10 ⁻⁷ –10 ^{-7.5}	–
Содержание CO ₂	Высокое	Высокое	Низкое	–
P _{H₂O} , кбар	0.001	0.001	0.5	–
Источники	[Луканин и др., 1980; Романчев, Флеров, 1980; Флеров и др., 1980]			[Флеров и др., 2015]

Примечание. Условия кристаллизации определялись на основе изучения расплавных включений и из экспериментов по плавлению и кристаллизации пород, а также по составам минералов с использованием геотермобарометров из [Kudo, Weill, 1970; Thompson, 1975; Saxena, 1976; Wells, 1977; Powell, 1978; Пономарев, Пузанков, 2012]. Sp₁ – хромшпинель, Sp₂ – хромистый магнетит, Sp₃ – хромистый титаномагнетит, Sp₄ – безхромистый титаномагнетит, Fo – форстерит, Cpx – клинопироксен, Opx – ортопироксен, Pig – пижонит, An – анортит.

(CaO = 0,07–0,49 %), Pl представлен лабрадоритом с An_{74-55} и $Or_{1,78-4,40}$, Crx – диопсидом и диопсид-авгитом с магнезиальностью $Mg\#_{76-88}$, Sp представлена хромпикотитом с Cr_2O_3 до 54 % [Флеров и др., 1984].

Минералогия высоко-Al пород систематически отличается от двух ранее приведенных ассоциаций: Ol имеет состав Fo_{76-69} (CaO = 0,17–0,40 %), плагиоклаз представлен лабрадоритом An_{73-52} и $Or_{0,8-3,1}$, Crx – авгитом с магнезиальностью $Mg\#_{82-66}$, Sp – TiMt (см. табл. 2.4). Крупные мегакристаллы Pl, которые часто встречаются в этих породах, могут быть обогащены CaO и меняются по составу в диапазоне An_{80-44} . Составы минералов промежуточных типов базальтов сильно изменчивы, поскольку они включают минералы разных ассоциаций, которые в целом могут не находиться в равновесии. Поля этих пород на петрологических диаграммах также перекрываются с полями других типов базальтов.

Недавние исследования показали, что минералы стратовулканов и высоко-Al лав типа III значительно отличаются: оливин из высоко-Al лав обогащен по CaO, плагиоклаз – по Or компоненте, а клинопироксен – по титану в сравнении с породами стратовулканов [Флеров и др., 2015]. Шпинели из высоко-Al базальтов обеднены железом, но обогащены хромом в сравнении со шпинелями из пород стратовулканов. Основные массы высоко-Al лав также обогащены щелочными элементами в сравнении со всеми другими породами Толбачинского массива. Отдельные фенокристаллы всех ассоциаций могут быть найдены практически в любой породе как неравновесные фазы, что предполагает активные процессы смешения, происходящие под Толбачинским вулканическим массивом [Флеров и др., 2015]; см. гл. 8. Это также подтверждается наличием химически разных матричных стекол в некоторых образцах.

В течение 35 лет после извержения 1975–1976 гг. на его конусах описано 120 постэруптивных минералов, из которых 32 были открыты впервые и 52 найдены на Камчатке [Вергасова, Филатов, 2012]. Минералы эксгаляций в основном состоят из литофильных (K, Na, Mg, Ca, Al, Si, Rb, Cs, P, V, S, O, F, Cl) и халькофильных (S, Cu, Zn, Pb, As, Se, Au, Bi, Te) элементов, из сидерофильных элементов присутствуют Fe и Mo [Там же]. Среди них выделены фториды, хлориды и оксохлориды, карбонаты, арсенаты, ванадаты, сульфаты и оксосульфаты, селениты и оксоселениты. Большинство их безводные. Согласно экспериментальным данным, металлы в Толбачинских фумаролах могут переноситься в виде хлоридов, оксохлоридов, в виде готовых оксоцентрированных комплексов OA_4 , реже могут переноситься и отлагаться в отсутствие паров воды. Медь, как представляется, тесно связана с K и Na и может транспортироваться с ними в газовой фазе, формируя медные проявления, сложенные минералами эксгаляций, богатыми медью, непосредственно в прикратерной зоне конусов [Набоко, Главатских, 1983; Вергасова и др., 2007].

УСЛОВИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

При изучении расплавных включений в Ol, Crx и Pl в породах БТТИ обнаружено, что высоко-Mg расплавы кристаллизовались при более высоком давлении CO_2 в сравнении с высоко-Al базальтами, расплавные включения в которых не содержали жидкого CO_2 , что предполагает большую глубину кристаллизации для высоко-Mg базальтов (см. табл. 2.4; [Романчев, Флеров, 1980]). Термометрические эксперименты с расплавными включениями показали, что высоко-Mg лавы кристаллизовались при более высоких температурах, чем высоко-Al базальты (1260–1180 и 1190–1140 °C соответственно).

Мегакристаллы плагиоклаза в высоко-Al расплавах кристаллизовались при температуре 1150 °С [Там же]. Породы промежуточных типов обнаруживают сильно неравновесные условия. Тем не менее эксперименты по плавлению и кристаллизации показали довольно близкие температуры кристаллизации для высоко-Mg и высоко-Al пород – 1195–1165 и 1185–1155 °С соответственно [Луканин и др., 1980]. Температуры кристаллизации, оцененные по минеральным парагенезисам для пород стратовулканов, оказались довольно низкими – 1150–1200 °С для безводных условий и 1070–1090 °С при содержании воды в расплаве 1–3 % [Флеров и др., 2015].

Давления кристаллизации оценивались по минеральным ассоциациям. Для лав высоко-Mg базальтов Северного прорыва БТТИ отмечается снижение давления в ходе кристаллизации от 0.4–0.5 ГПа (13–18 км) для ОI и Рх до менее чем 0.1 ГПа (менее 3 км) для РI [Луканин и др., 1980; Романчев, Флеров, 1980]. Высоко-Al лавы Южного прорыва БТТИ кристаллизовались в приповерхностных условиях при давлении 0.1–0.3 ГПа. Расчетные давления кристаллизации для пород стратовулканов составили 4–7.5 кбар, что соответствует глубине около 12–22 км [Флеров и др., 2015].

ПЕТРОХИМИЯ

Хотя к моменту извержения 2012–2013 гг. данные по составам пород пьедестала и стратовулканов массива были крайне ограничены, отмечалось, что лавы конусов систематически отличаются от лав главных построек [Флеров, Мелекесцев, 2013]. Изменения в петрохимии и геохимии связывались со сменой вулканизма центрального типа на вулканизм ареального типа [Ермаков, Важеевская, 1973; Флеров, Мелекесцев, 2013].

Как отмечалось ранее, все базальты моногенных конусов Толбачинского массива были разделены по величине отношения MgO/Al_2O_3 на четыре типа (см. рис. 2.11, б; [Флеров и др., 1984]): тип I – высоко-Mg ($MgO/Al_2O_3 > 0.58$), тип II – промежуточные магнезиальные ($0.45 < MgO/Al_2O_3 < 0.58$), тип III – высокоглиноземистые ($MgO/Al_2O_3 < 0.32$) и тип IV – промежуточные глиноземистые ($0.32 < MgO/Al_2O_3 < 0.45$). Типы I и II являются средне-K, в то время как большинство образцов типов III и IV – высококалиевые трахибазальты. Высоко-Mg лавы обогащены по MgO, CaO и MgO/Al_2O_3 , в то время как высоко-Al трахибазальты обогащены по FeO, CaO, Al_2O_3 , TiO_2 , K_2O , Na_2O , P_2O_5 и K_2O/Na_2O . Обе серии обеднены по SiO_2 и обогащены по FeO и TiO_2 в сравнении со всеми другими породами вулканов ЦКД (рис. 2.12). Наиболее распространенными породами являются высоко-Mg базальты (тип I) и высоко-Al трахибазальты (тип III), которые часто соединены между собой на петрохимических диаграммах породами типов II и IV [Брайцева и др., 1984а; Флеров и др., 1984].

В течение голоцена все типы пород неоднократно извергались, при этом высоко-Al породы преобладали по объему. Породы возрастной группы I (7.8–10.0 тыс. лет назад) состоят только из базальтов типа III. Породы возрастной группы II (1.7–7.8 тыс. лет назад) на 92.5 % также являются базальтами типа III, оставшиеся породы относятся к промежуточным типам II и IV. Первые высоко-Mg лавы появились около 1.7 тыс. лет назад во время периода III (1.4–1.7 тыс. лет назад), когда стали извергаться все типы пород, при этом сохранилось преобладание высоко-Al трахибазальтов. Похожая ситуация продолжалась и во время возрастного периода IV (0.8–1.4 тыс. лет назад), когда извергались все типы лав за исключением типа IV, при этом относительный объем высоко-Mg

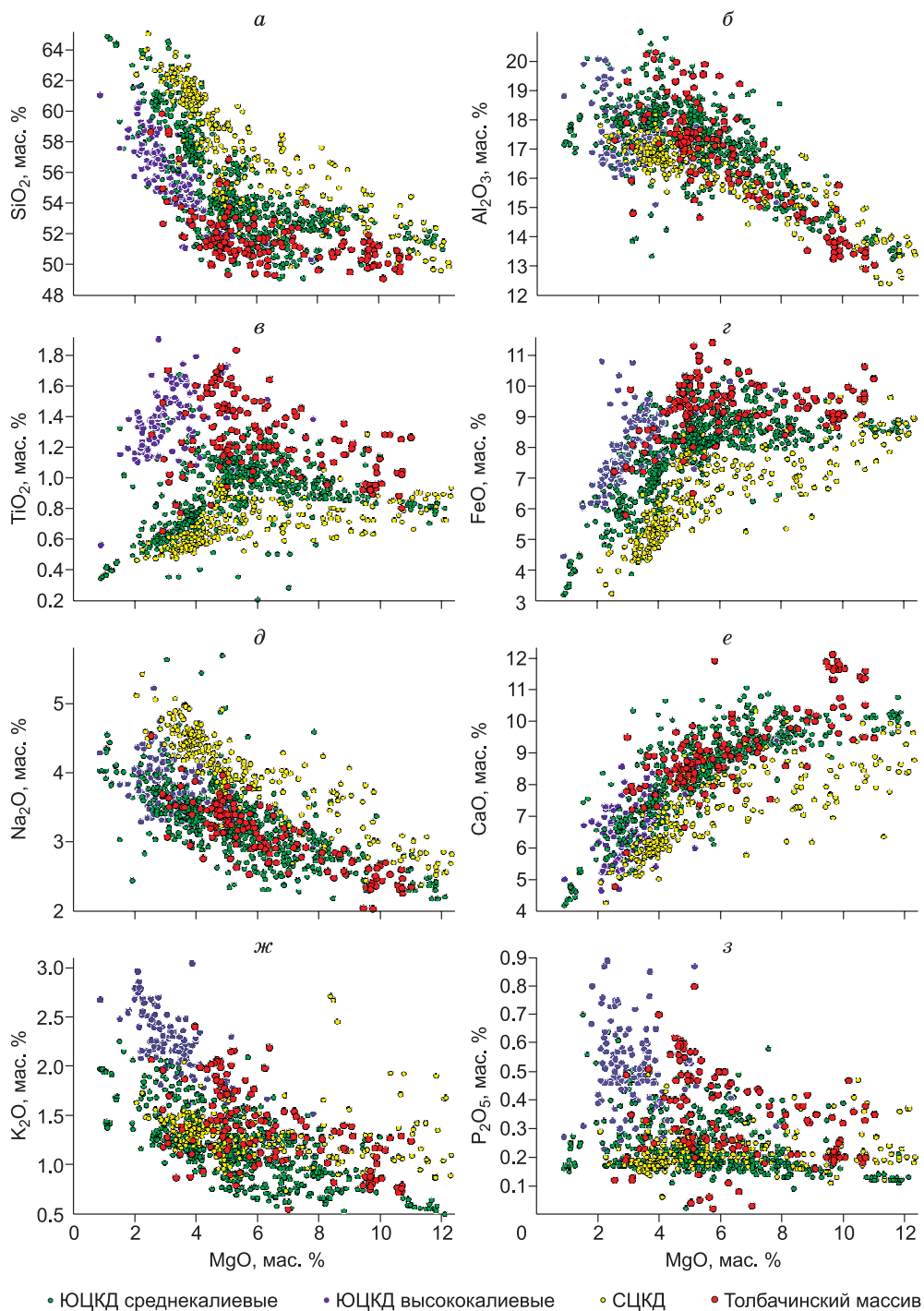


Рис. 2.12. Макроэлементный состав пород Толбачинского вулканического массива в сравнении с другими вулканами ЦКД. Породы Толбачинского массива характеризуются низкими значениями SiO_2 и высокими FeO и TiO_2 в сравнении с другими породами ЦКД. Источники данных и символы такие же, как на рис. 2.6

пород начал возрастать. Начиная с 0.8 тыс. лет назад до исторического времени известно только одно высоко-Mg извержение конуса Красный; все другие извержения этого периода извергали высоко-Al трахибазальтовые лавы типа III. В историческое время извергались породы всех четырех типов: все вершинные извержения поставляли на поверхность высоко-Al трахибазальты типа III, породы извержения 1941 г. представлены высоко-Mg базальтами типа I, а во время извержения 1975–1976 гг. были извержены все четыре типа лав, при этом лавы типа II и IV имели относительно небольшие объемы.

Несмотря на то что две основные базальтовые серии, высоко-Mg базальты и высоко-Al трахибазальты, изливались в зоне моногенных шлаковых конусов в голоцене, высоко-Al породы преобладали и на этом временном участке. Эти две базальтовые серии различаются прежде всего концентрациями макроэлементов с наибольшими вариациями по MgO и Al_2O_3 . Отношения MgO/Al_2O_3 и K_2O/Na_2O в двух этих сериях формируют отдельные непересекающиеся поля и имеют различающиеся тренды фракционирования внутри каждого поля. Состав продуктов извержений типа II довольно близок к высоко-Mg породам, в то время как состав типа IV близок высоко-Al базальтам.

На основе систематических различий двух серий пород высказано предположение о существовании под Толбачинской трещинной зоной моногенного вулканизма двух химически различных и генетически не связанных первичных базальтовых магм. Все изменения в переходных типах пород объяснялись при этом смешением дериватов этих расплавов [Брайцева и др., 1984а; Флеров и др., 1984]. Другие варианты петрохимических различий обсуждены в гл. 5 и 8.

МИКРОЭЛЕМЕНТЫ И ИЗОТОПЫ

До извержения 2012–2013 гг. микроэлементный и изотопный состав был определен только в породах некоторых конусов Толбачинского вулканического массива. Микроэлементный состав Толбачинских лав меняется в широких пределах (см. рис. 2.7). Высоко-Mg продукты извержений типа I обогащены по Cr, Ni, Co, V, в меньшей степени по Zn и Sr, в то время как высоко-K трахибазальты обогащены по Rb, Ba, Th, Li, B, Be, а также по большинству несовместимых элементов (за исключением Sr), включая высокорядные элементы (Zr, Nb, Ta, Hf), Y и редкие земли, при этом Nb и Ta показывают характерный субдукционный минимум (см. рис. 2.7) с широкими вариациями внутри него [Петров и др., 1979; Churikova et al., 2001]. Кроме того, высоко-Mg базальты имеют повышенные концентрации Pt и повышенное $Pt/(Pt+Pd)$ отношение в сравнении с высоко-K лавами. В то же время высоко-K трахибазальты обогащены по Au, Ag и Ag/Au отношению [Аношин и др., 1982, 1983]. Две серии пород также значительно различаются и по отношениям микроэлементов: La/Yb , Ce/Y и V/Ni выше, а Ni/Co ниже в высоко-K породах в сравнении с высоко-Mg базальтами (рис. 2.13). Европиевая аномалия отсутствует во всех изученных образцах [Флеров и др., 1984].

Широкие вариации изотопов Sr в породах ЦКД, а также изменения величин изотопов $\delta^{18}O$ от мантийных до высокорადиогенных в фенокристаллах из пород КГВ вместе с результатами изучения расплавных включений свидетельствуют о взаимодействии расплавов из перидотитового источника (с мантийными значениями $\delta^{18}O$) с высокорадигенными источниками, к которым могут относиться литосферная мантия, нижняя континентальная кора или субдукционный флюид [Dorendorf et al., 2000; Bindeman et al., 2004; Portnyagin et al., 2007a; Auer et al., 2009]. Изотопные отношения Sr, Nd, Pb и $\delta^{18}O$ для высоко-Mg

и высоко-К базальтов Толбачинской зоны моногенных конусов в целом заметно ниже, чем для других пород ЦКД (рис. 2.14, *a*), что ограничивает количество осадочного материала в источниках плавления их лав до количеств, не превышающих один процент [Kersting, 1995; Turner et al., 1998; Churikova et al., 2001].

Несмотря на широкий диапазон содержаний микроэлементов, не было выявлено систематических вариаций в изотопных отношениях Sr, Nd и Pb между разными типами пород толбачинских конусов. Диапазоны значений отношений $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ (1.89–1.94) и $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ (1.83–1.98) также относительно

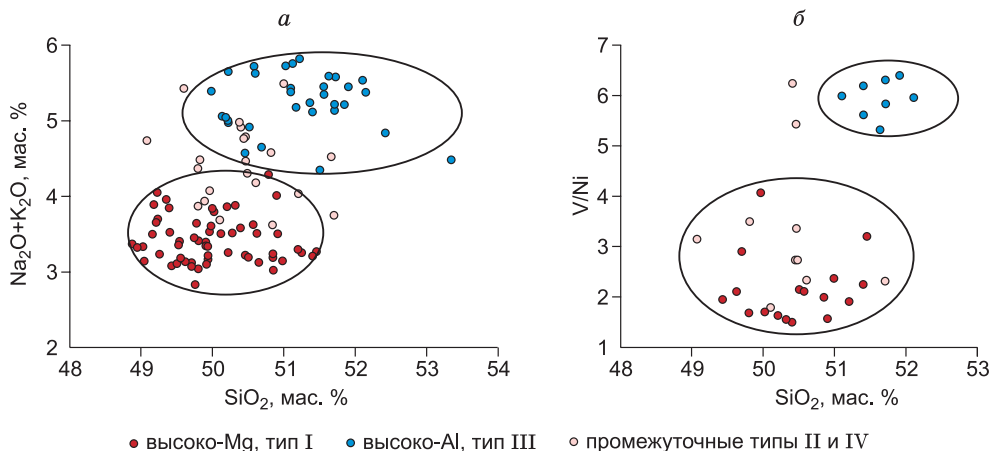


Рис. 2.13. Содержания макро- и микроэлементов в породах лав Толбачинского дола. *a* – зависимость суммы щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) от SiO_2 ; *b* – зависимость отношения V/Ni от SiO_2 . Овалами показаны поля высоко-Mg и высоко-Al лав. Данные для графиков взяты из [Portnyagin et al., 2007a]

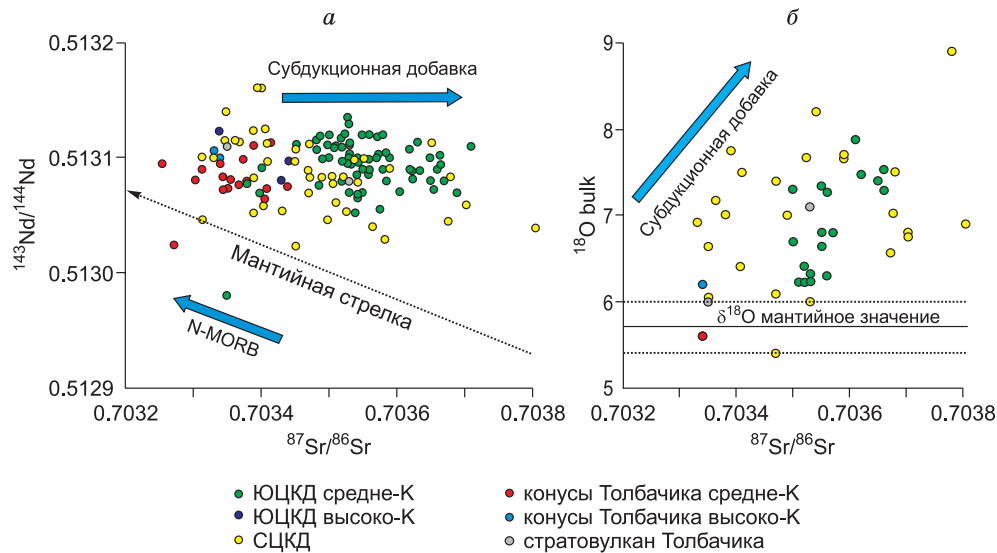


Рис. 2.14. Изотопные составы пород ЦКД.

Зависимости $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ от $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (*a*) и $\delta^{18}\text{O}$ от $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (*b*) в породах ЦКД. Данные по моногенным конусам Толбачинского вулканического массива разделены цветом на средне-К (красные кружки) и высоко-К (розовые кружки) лавы. Единичное определение изотопов в породе стратовулкана показано серым кружком. Другие символы, как на рис. 2.6. Мантийная стрелка на диаграмме Sr-Nd изотопов определена составами MORB и OIB по [De Paolo, Wasserburg, 1976; McCulloch, Perfit, 1981]. Предполагаемое мантийное значение $\delta^{18}\text{O}$ взято из [Taylor, 1980].

Данные для графиков взяты из [Portnyagin et al., 2007a; Almeev et al., 2013b]

узкие для всех лав Толбачинского дола. Большинство данных близки к линии равновесия, указывая на то, что время, прошедшее с момента U/Th фракционирования, превышает 150 тыс. лет [Turner et al., 1998, 2001; Dosseto et al., 2003]. Отношения $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ и $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ также обнаруживают довольно близкие значения как для высоко-Mg, так и для высоко-K образцов: 0.175 и 0.147, 235 и 183 соответственно [Alves et al., 2002], что также не согласуется со значительной ролью осадочного материала в мантийных источниках.

2.2.9. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ДВУХ СЕРИЙ ВУЛКАНИТОВ

Происхождение двух серий пород в Толбачинской зоне моногенного вулканизма активно обсуждается в опубликованных работах и в гл. 4, 5 и 8 настоящей монографии. Как на диаграммах макроэлементов, так и на некоторых диаграммах малых элементов (в том числе, Rb–Ba, Rb–Sr) высоко-K и высоко-Mg базальты формируют отдельные неперекрывающиеся поля. Более того, экспериментальные данные по породам БТТИ указывали на то, что высоко-Mg базальты кристаллизовались при более высоком давлении CO_2 и в безводных условиях, в то время как высоко-K базальты – при низком давлении CO_2 , но при повышенных значениях H_2O , что согласуется с большими глубинами кристаллизации фенокристаллов из высоко-Mg расплавов в сравнении с высоко-K (см. табл. 2.4; [Луканин и др., 1980; Романчев, Флеров, 1980; Флеров и др., 1980]. Тем не менее последние исследования расплавных включений в образцах из высоко-Mg базальтов высоты 1004 (см. рис. 2.11) показали, что концентрация H_2O в первичном расплаве составляла 2.42 мас. % [Portnyagin et al., 2007b], что гораздо выше ранее опубликованных результатов. Основываясь на систематической разнице в содержаниях макро- и микроэлементов и в их отношениях, а также на различных трендах фракционирования в сочетании с различными P–T– H_2O – CO_2 условиями кристаллизации, авторы работы [Флеров и др., 1984] выдвинули предположение, что две серии пород произошли из различных мантийных источников.

Однако близкие примитивные изотопные значения Sr и Nd и субпараллельные распределения микроэлементов свидетельствуют в пользу формирования всех типов пород из единого мантийного источника. Наибольшее обогащение высоко-K трахибазальтов в сравнении с высоко-Mg лавами наблюдается по элементам, подвижным с флюидом (K, Rb, P, Ba и Pb). Высоко-K трахибазальты также обогащены по H_2O в сравнении с высоко-Mg лавами [Pineau et al., 1999]. На основании этих данных выдвинуто предположение [Churikova et al., 2001, 2013], что высоко-Mg и высоко-K расплавы могли происходить из одного или похожих мантийных источников, которые были в разной степени обеднены предыдущими выплавками (меньшая степень обеднения для высоко-K трахибазальтов) и при различном обогащении субдукционным флюидом (более высокое обогащение в лавах высоко-K трахибазальтов).

К моменту извержения 2012–2013 гг. практически не было данных по содержаниям микроэлементов и изотопов в образцах пьедестала и стратовулканов Толбачинского вулканического массива. Исключение составлял единственный образец PT33-1/82, который анализировался на микроэлементы и на изотопы Sr, Nd, Pb, U–Th–Pa–Ra и Re–Os [Pineau et al., 1999; Alves et al., 2002; Dosseto et al., 2003].

2.2.10. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

С момента создания Камчатской вулканологической станции в пос. Ключи 1 сентября 1935 г. ее сотрудниками ведется регулярное наблюдение за дей-

ствующими вулканами КГВ (см. рис. 2.4). Важнейшая задача заключалась в непрерывном наблюдении за извержениями вулкана Ключевской, который уже в те годы был признан одним из самых активных вулканов в мире. Здесь же, на вулканостанции, в 1946 г. была установлена первая сейсмическая станция вблизи КГВ. Следующая сейсмическая станция была поставлена в пос. Козыревск в 1958 г. К этому времени были закончены и работы по проведению аэрофотосъемки на вулканах Камчатки [Ivanov, 1983].

Большое трещинное Толбачинское извержение является классическим примером использования сейсмического сигнала для предсказания будущего извержения. Более чем за неделю до начала извержения Северного прорыва БТТИ ряд крупных (4–5 М) землетрясений был зарегистрирован региональными станциями [Токарев, 1976; Токарев и др., 1984]. Эпицентры извержений указывали на район Толбачинского дола, и на основе этих данных на следующую неделю было предсказано извержение вулкана. Начало извержения совпало с прогнозом. Эти сильные землетрясения, предвещавшие извержение 1975–1976 гг., косвенно явились причиной того, что начало извержения 2012–2013 гг., которому предшествовала гораздо меньшая сейсмическая активность, не было предсказано, несмотря на значительно развитую с 1975 г. региональную сейсмическую сеть. Сейсмический сигнал, извещающий извержение 2012–2013 гг. был обнаружен и распознан только при ретроспективном анализе сейсмических данных [Senyukov et al., 2015].

Камчатские вулканы при извержениях зачастую выбрасывают в атмосферу пепловые облака, которые могут распространяться на восток и пересекать маршруты следования самолетов между Северной Америкой и Азией. Поэтому Камчатская группа реагирования на вулканические извержения (КВЕРТ), используя спутниковые снимки, осуществляет постоянный мониторинг вулканической активности [Гирина, Гордеев, 2007; Гордеев, Гирина, 2014]. Кроме того, Камчатский филиал Геофизической службы обеспечивает постоянный мониторинг за вулканами КГВ при помощи сети сейсмологических станций [Senyukov et al., 2015], включающей в себя также пять постоянно действующих станций, расположенных в радиусе 20 км от Толбачинского массива, а также несколько постоянных GPS-станций.

Извержение 2012–2013 гг. стало важной вехой в мониторинге камчатских вулканов. Наблюдения за этим извержением включали не только анализ сейсмических и GPS-данных, но также наземные измерения температуры лавы (см. напр., [Edwards et al., 2014, 2015]), регулярные отборы образцов лав и тефры с последующим анализом их химического состава [Volynets et al., 2015], всесторонний мониторинг вулканической деятельности с помощью дистанционного теплового зондирования в диапазонах с различными длинами волн при помощи сканирующего спектрорадиометра среднего разрешения, а также с помощью инструментов для определения содержания SO_2 [Telling et al., 2015] (см. также гл. 3).

ВЫВОДЫ

Большая часть информации по геологии и петрологии Толбачинского вулканического массива получена на основании изучения Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. Но сколь бы детально не было изучено одно, пусть даже одно из крупнейших, извержение, с этими знаниями невозможно построить полную непротиворечивую картину развития крупного вулканического массива. Поэтому полученные данные зачастую являются неоднозначными, и эти неоднозначности должны быть разрешены в будущем глубоко-

ким изучением как самого Толбачинского массива, так и его окружения. Ниже приведены нерешенные вопросы по главным направлениям исследований.

Геология. Геологическая карта массива была составлена В.А. Ермаковым и А.А. Важеевской [1973] в 70-х годах прошлого века. Тем не менее тектоническая позиция юго-западной части Ключевской группы вулканов (КГВ) до сих пор не ясна. Например, не понятны взаимоотношения между пьедесталом Толбачинского массива и основанием КГВ. Вулканы, соседние с Толбачинским массивом и расположенные к востоку и югу от него, такие как Удины Сопки, Зимины Сопки, Горный Зуб и Николка, остаются практически неизученными. Разломные зоны Толбачинского массива, как и Плоских Сопок, не исследовались инструментально и рассматриваются как предполагаемые, а о причинах их возникновения есть лишь отдельные предположения.

Геохимия. Детальная петрологическая карта моногенного лавового поля была составлена Г.Б. Флеровым [Флеров и др., 1984]. Лавы извержения 1975–1976 гг. детально изучались высокоточными современными методами геохимии и изотопной химии. К моменту извержения 2012–2013 гг. среди лав моногенного поля было выделено две генетически не связанные серии пород: высоко-Mg и высоко-Al базальты. Исследователями предлагались различные гипотезы, объясняющие образование этих вулканических серий: в разной степени обедненный мантийный клин; разные количества добавок субдукционных компонентов; фракционная кристаллизация внутри каждой серии с последующими эпизодами смешения и др. Как было показано, мантийный клин под Толбачинским массивом является наиболее горячим в КГВ, а расплавные включения в оливинах содержат заметное количество воды. В то же время эксперименты по кристаллизации предполагают существенно более низкие температуры и содержания воды. Другие комплексы Толбачинского вулканического массива (включая оба стратовулкана, дайковый комплекс, основание массива) на момент извержения 2012–2013 гг. оставались очень слабо изученными. Не все голоценовые конусы и их лавовые потоки геохимически опробованы и анализированы, поскольку основное внимание уделялось только историческим извержениям. В результате полная петролого-геохимическая модель Толбачинского массива, описывающая вариации составов пород стратовулкана и конусов, а также отклики составов пород на смену геодинамической обстановки, так и не была построена, а извержение 2012–2013 гг. имело неожиданный для исследователей состав продуктов.

Геофизика. Несмотря на то что извержение 1975–1976 гг. было точно предсказано как по месту, так и по времени [Токарев, 1976], извержение 2012–2013 гг. предсказано не было. Оказалось, что предшествующая извержению сейсмическая активность может быть очень слабой. Вероятно, геофизические наблюдения должны быть усилены в этой потенциально опасной части КГВ. Кроме того, многие вопросы по глубинному строению всей группы, каждого вулкана и каждого извержения до сих пор остаются открытыми. Эти проблемы должны решаться не только увеличением приборного парка, но и использованием новых методов, таких как локальная томография [Koulakov et al., 2011, 2013], пассивная сейсмическая интерферометрия, поверхностно-волновая томография по окружающему сейсмическому шуму высокого разрешения [Shapiro et al., 2005], 4D изображения по окружающему сейсмическому сигналу [Brenguier, 2008], анализ отношения сейсмических амплитуд с целью иллюстрации динамики движения магмы [Taisne, 2011] и низкочастотное микросейсмическое зондирование [Кугаенко и др., 2013; Gorbatikov et al., 2013].

Указанные методы исследования также могут помочь объяснить вариации состава магмы при извержениях.

Геохронология. Благодаря тефрохронологическому методу исследования вулканических отложений и радиоуглеродному датированию голоценовая история Толбачинской зоны моногенных конусов была реконструирована в деталях [Брайцева и др., 1981, 1984а]. Однако чрезвычайно слабая изученность КГВ прямыми методами изотопного датирования приводит к тому, что плейстоценовая история Толбачинского вулканического массива и соседних вулканов КГВ, как и всей структуры ЦКД, до сих пор остается неясной, что не позволяет понять зависимости химических составов вулканических пород в пространстве и времени от их тектонического положения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Недавние многолетние международные проекты, направленные на изучение вулканов Безымянный (Россия–США) и Ключевской (Россия–Япония) предоставили для исследователей ценные междисциплинарные данные о двух наиболее активных вулканах КГВ. Эти данные позволяют анализировать процессы генерации магмы, ее нахождение в промежуточном очаге, передвижение, эволюцию и ее извержение в тектонически сложной обстановке. Желательно создать аналогичный проект по Толбачику. В заключение отметим, что Камчатка с ее доступностью и обнаженностью является прекрасным полигоном для междисциплинарных исследований зон субдукции. Толбачинский вулканический массив с его крайне примитивными и разнообразными базальтовыми магмами и необычным гавайским стилем извержений, обладающий активной рифтоподобной структурой, развитой внутри субдукционной зоны, также является прекрасным кандидатом для будущих междисциплинарных исследований.

БЛАГОДАРНОСТИ

Этот раздел был поддержан грантами № 13-05-92104 и № 16-55-12040 Российского фонда фундаментальных исследований. Дискуссии с И.В. Мелекесцевым, Г.Б. Флеровым, Ю.А. Кугаенко, Л.П. Вергасовой и О.В. Бергаль-Кувикас помогли значительно улучшить первоначальный вариант рукописи.

2.3. ЭРУПТИВНАЯ АКТИВНОСТЬ ВУЛКАНА ПЛОСКИЙ ТОЛБАЧИК В ИСТОРИЧЕСКОЕ ВРЕМЯ

Исторический период на Камчатке охватывает три столетия со времени прихода на полуостров казаков под предводительством атамана В. Атласова в 1696 г., когда появились первые сведения о «горелых» сопках. Тем не менее данные об активности вулканов Камчатки практически до начала работы Камчатской вулканостанции в 1935 г., особенно для XVIII–XIX столетий, скудны и разрозненны. В настоящее время подобное состояние хронологии вулканической деятельности затрудняет прогнозирование извержений статистическими методами, отрицательно сказывается на понимании вулканического процесса и оценках многолетнего хода загрязнения окружающей среды. Большой вклад в решение этих проблем внесли тефрохронологические исследования, опирающиеся на радиоуглеродное датирование. Но реально результаты этих работ существенны в основном для больших временных масштабов (свыше 1000 лет) и событий, носивших катастрофический характер для региона, в то время как множество менее мощных и более молодых извержений остаются за пределами возможностей подобных методов.

ЛИТЕРАТУРА

Абкадыров И.Ф., Букатов Ю.Ю., Геранин К.О. Результаты микросейсмического зондирования в районе Авачинского вулкана // Матер. XIII Регион. молодежной науч. конф. «Природная среда Камчатки». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 103–114.

Авдейко Г.П., Антонов А.Ю. Волынец О.Н. и др. Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги. М.: Наука, 1992. 528 с.

Авдейко Г.П., Погруженко С.В., Палуева А.А. Тектоническое развитие и вулканотектоническое районирование Курило-Камчатской островодужной системы // Геотектоника. 2002. № 84. С. 64–80.

Адамчук Ю.В., Трубников Б.А. Электропроводность текущей лавы Южного Ново-Толбачинского прорыва, 2841. М.: Ин-т атомной энергии, 1977. № 2. С. 47–61.

Акинин В.В. Позднемезозойский и кайнозойский магматизм и преобразование нижней коры в северном обрамлении Пацифики: автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ РАН, 2012.

Андреев В.И., Топчиева О.М. Гора Поворотная – фрагмент стратовулкана, расположенного к северо-востоку от вулкана Плоский Толбачик // Вулканизм и связанные с ним процессы: регион. науч. конф., посвящ. Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, 29–30 марта 2013 г.: матер. конф. / под ред. Е.И. Гордеева. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2013. С. 15–19.

Аносов Г.И., Биккенина С.Л., Попов А.А., Сергеев К.Ф., Федорченко В.И., Утнасин В.К. Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки. М.: Наука, 1978. 130 с.

Аношин Г.Н., Волынец О.Н., Флеров Г.Б. К геохимии золота и серебра в базальтах Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. // Докл. АН СССР. 1982. Т. 264, № 1. С. 195–197.

Аношин Г.Н., Волынец О.Н., Флеров Г.Б., Голованова Н.П., Цимбалист В.Г. Первые данные по распределению платиноидов в современных базальтах Камчатки // Докл. АН СССР. 1983. Т. 268, № 4. С. 967–969.

Антонович К.М., Карпик А.П., Клепиков А.Н. Спутниковый мониторинг земной поверхности // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2004. № 1. С. 4–10.

Аптикаев Ф.Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности. М.: Наука и образование, 2012. 176 с.

Арискин А.А., Бармина Г.С., Озеров А.Ю., Нильсон Р.Л. Генезис высокоглиноземистых базальтов Ключевского вулкана // Петрология. 1995. Т. 3, № 5. С. 42–67.

Базанова Л.И., Певзнер М.М. Хангар – еще один действующий вулкан на Камчатке // Докл. АН. 2001. Т. 377, № 6. С. 800–802.

Байков А.И., Кутыев Ф.Ш., Аникин Л.П. и др. Самородная медь магматических комплексов Камчатки // Самородные металлы в изверженных породах: тез. докл. Всесоюз. конф. «Самородное элементообразование в эндогенных процессах». Ч. I. Якутск, 1985. С. 58–59.

Байраков В.В. Самородный алюминий в терригенных отложениях Крыма // Докл. НАНУ. 2009. № 9. С. 102–106.

Балеста С.Т. Сейсмические данные о магматических очагах Большого трещинного Толбачинского извержения // Вулканология и сейсмология. 1979. № 2. С. 4–11.

Балеста С.Т. Строение земной коры и магматические очаги областей современного вулканизма Камчатки // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. Природа

вулканических процессов на Камчатке. Вулканы Северной Камчатки и Срединного хребта / ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. М.: Наука, 1991. С. 36–45.

Балеста С.Т., Гонтовая Л.И., Каргапольцев А.А., Пак Г., Пушкарёв В.Г., Сеников С.Л. Результаты сейсмических исследований земной коры в районе Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1991. № 3. С. 3–18.

Балеста С.Т., Каргапольцев А.А., Григорян Г.Б. Сейсмическое просвещение Новых Толбачинских вулканов на Камчатке // Докл. АН СССР. 1977. Т. 237, № 2. С. 412–415.

Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. Извержение вулкана Шивелуч в 1964 г. (Камчатка) – плинианское извержение, предвалявшееся крупномасштабным обрушением постройки // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4–5. С. 116–126.

Белоусов А.Б., Белоусова М.Г. Отложения и последовательность событий извержения вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. // Вулканология и сейсмология. 1998. № 1. С. 25–40.

Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный мир, 2009. С. 677.

Богатиков О.А., Коваленко В.И., Шарков Е.В. Магматизм, тектоника, геодинамика Земли. Связь во времени и в пространстве // Тр. Ин-та геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии. 2010. № 3. 615 с.

Богданов Н.А., Добрецов Н.Л. Охотское океаническое вулканическое плато // Геология и геофизика. 2002. Т. 43, № 2. С. 97–110.

Богданов Н.А., Чехович В.Д. О коллизии Западно-Камчатской и Охотоморской плит // Геотектоника. 2002. № 1. С. 72–85.

Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Богоявленская Г.Е., Максимов А.П. Вулкан Безымянный: история формирования и динамика активности // Вулканология и сейсмология. 1990. № 2. С. 3–22.

Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Пономарева В.В., Литасова С.Н., Сулержицкий Л.Д. Тейфрхронологические и геохронологические исследования Толбачинской региональной зоны шлаковых конусов // Вулканология и сейсмология. 1981. № 3. С. 14–28.

Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Флеров Г.Б., Пономарева В.В., Сулержицкий Л.Д., Литасова С.Н. Голоценовый вулканизм Толбачинской региональной зоны шлаковых конусов // Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка 1975–1976 / ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984а. С. 177–223.

Брайцева О.А., Сулержицкий Л.Д., Литасова С.Н., Гребзды Э.И. Радиоуглеродные даты отложений голоценовых почвенно-пирокластических чехлов Ключевской группы вулканов // Вулканология и сейсмология. 1984б. № 2. С. 110–115.

Будников В.А. Пирокластика современных базальтовых извержений. Владивосток: Дальнаука, 1996. 160 с.

Быкасов В.Е. Шлаково-пепловый чехол извержения 1975 г. и поражение растительности Толбачинского дола // Вулканология и сейсмология. 1981. № 1. С. 76–78.

Важеевская А.А. К вопросу об ареальном вулканизме Камчатки // Современный вулканизм. М.: Наука. 1966. С. 66–68.

Важеевская А.А. Особенности ареального вулканизма Камчатки // Проблемы глубинного магматизма. М.: Наука, 1979. С. 97–108.

Вергасова Л.П., Филатов С.К. Новые минералы в продуктах фумарольной деятельности Большого Трещинного Толбачинского извержения // Вулканология и сейсмология. 2012. № 5. С. 3–12.

Вергасова Л.П., Серафимова Л.П., Главацких С.Ф. Минералогия и геохимия возгонов // Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка 1975–1976. М.: Наука, 1984. 637 с.

Вергасова Л.П., Филатов С.К., Дунин-Барковская В.В. Постэруптивная деятельность Первого конуса БТТИ и современное вулканогенное формирование бокситов // Вулканология и сейсмология. 2007. № 2. С. 55–77.

Викулин А.В. О длине приповерхностной трещины, через которую осуществляется питание конусов Северного прорыва Толбачинского извержения 1975 г. // Вулканология и сейсмология. 1984. № 3. С. 82–87.

Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д. Изменчивость современных ледников вулканических районов Камчатки // Морской гидрофизич. журн. 1981. Вып. 42. С. 164–170.

Виноградов В.И., Григорьев В.С., Кастрыкина В.М. Возраст метаморфических пород фундамента Камчатки // Сов. геология. 1991. № 7. С. 58–65.

Виноградов В.И., Григорьев В.С., Лейтес А.М. Возраст метаморфизма пород Срединного хребта Камчатки // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1988. № 9. С. 30–38.

Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д., Овсянников А.А. Влияние извержения вулкана Плоский Толбачик 1975–76 гг. на снежный покров и ледники // Вопр. географии Камчатки. Вып. 9. Петропавловск-Камчатский, 1985. С. 95–102.

Витер И.В. Камчатская экспедиция Императорского Русского географического общества на средства Ф.П. Рябушинского (1908–1909) // Вопросы географии Камчатки. Камчатское отделение РГО, Камч. госуниверситет. 2008. Вып. 12. С. 7–8.

Влодавец В.И. Посещение кратера вулкана Плоский Толбачик 13 августа 1936 г. // Бюл. вулканол. станции на Камчатке. 1937. № 2. С. 27–35.

Влодавец В.И. Ключевская группа вулканов // Тр. Камчатской вулканол. станции. 1940. № 1. С. 4–124.

Влодавец В.И. Об ареальном и многовыходном вулканизме // Вулканизм, гидротермы и глубины Земли. Петропавловск-Камчатский, 1969. С. 23.

Влодавец В.И. Вулканизм // БСЭ. М., 1971. Т. 5. 3-е изд. С. 501.

Влодавец В.И., Пийп Б.И. Каталог действующих вулканов Камчатки // Бюл. вулканол. станций. 1957. № 25. С. 5–95.

Волынец А.О., Мельников Д.В., Якушев А.И. Первые данные о составе продуктов Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия ИВиС (Камчатка) // Докл. АН. 2013. Т. 452, № 3. С. 303–307.

Волынец О.Н., Бабанский А.Д., Гольцман Ю.В. Изотопные и геохимические вариации в лавах вулканов Северной группы (Камчатка) в связи с особенностями процесса субдукции // Геохимия. 2000. № 10. С. 1067–1083.

Волынец О.Н., Пономарева В.В., Бабанский А.Д. Магнезиальные базальты андезитового вулкана Шивелуч, Камчатка // Петрология. 1997а. Т. 5, № 2. С. 206–221.

Волынец О.Н., Пополитов Э.И., Флеров Г.Б., Кирсанов И.Т. Состав и геохимические особенности плагиоклазов четвертичных вулканических пород Камчатки и Курильских островов // Геохимия. 1977б. № 5. С. 736–747.

Волынец О.Н., Флеров Г.Б., Андреев В.Н. и др. Петрохимия, геохимия и вопросы генезиса пород Большого Трещинного Толбачинского извержения 1975–76 гг. // Докл. АН СССР. 1978а. Т. 238, № 4. С. 940–943.

Волынец О.Н., Флеров Г.Б., Андреев В.Н., Пополитов Э.И., Абрамов В.А., Петров Л.Л., Щека С.А., Селиванова Г.И. Петрогеохимические особенности пород Большого трещинного Толбачинского извержения в связи с вопросами их генезиса. Геологические и геофизические данные о Большом Толбачинском извержении 1975–1976 гг. / отв. ред. С.А. Федотов, Е.К. Мархинин. М.: Наука, 1978б. С. 86–105.

Гаврилов В.А., Воропаев В.Ф., Головщикова И.А. и др. Комплекс радиотелеметрической аппаратуры ТЕСИ_2 // Сейсмические приборы. 1987. Т. 19. С. 5–16.

Гарбузова В.Т., Соболевская О.В. Обновленная классификации вулканических землетрясений Камчатки П.И. Токарева // Вторая Регион. науч.-техн. конф. 11–17 октября 2009 г. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: тр. Второй Регион. науч.-техн. конф. 2010. С. 25–29.

Геологические и геофизические данные о Большом Толбачинском извержении 1975–1976 гг. / отв. ред. С.А. Федотов, Е.К. Мархинин М.: Наука, 1978. 256 с.

Геологический словарь. Том 1. М.: Недра, 1973. С. 123–124, 272.

Гирина О.А. Инженерно-геологические особенности шлаков Толбачинского дола и их преобразование в ходе поствулканических процессов // Инж. геология. 1986. № 1. С. 32–38.

Гирина О.А., Гордеев Е.И. Проект KVERT – снижение вулканической опасности для авиации при эксплозивных извержениях вулканов Камчатки и Северных Курил // Вестн. ДВО РАН. 2007. № 2. С. 100–109.

Гирина О.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г., Нуждаев А.А. Спутниковый мониторинг Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия ИВиС ДВО РАН в 2012–2013 гг. // Матер. конф., посвящ. Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский, 29–30 марта 2013 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2013. С. 50–56.

Главацких С.Ф. Самородные металлы и интерметаллические соединения в продуктах эксгаляций Большого трещинного Толбачинского извержения (Камчатка) // Докл. АН СССР. 1990. Т. 313, № 2. С. 433–437.

Главацких С.Ф., Трубкин Н.В. Первые находки самородного олова и серебра в продуктах эксгаляции Большого трещинного Толбачинского извержения (Камчатка) // Докл. АН. 2000. Т. 373. С. 997–999.

Глазырин Г.Е., Кислов Б.В. Использование стандартной метеорологической информации для выделения годовых слоев в фирново-ледяной толще горных ледников // Тр. САРНИГМИ. 1984. Вып. 105/186. С. 77–90.

Говоров Г.И., Цветков А.А., Аракелянц М.М. Магматизм Малой Курильской гряды по геохронологическим и геологическим данным // Докл. АН СССР. 1983. Т. 270, № 3. С. 664–668.

Гонтовая Л.И., Ермаков В.А., Сениюков С.Л., Назарова З.А. К вопросу о тектономагматической модели вулкана Плоский Толбачик и его ареальных зон // Вулканизм и связанные с ним процессы. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2015. С. 143–145.

Гонтовая Л.И., Попруженко С.В., Низкоус И.В., Апрельков С.Е. Верхняя мантия Камчатки: глубинная модель и связь с тектоникой // Тихоокеан. геология. 2008. № 2. С. 80–91.

Гонтовая Л.И., Попруженко С.В., Низкоус И.В. Структура верхней мантии зоны перехода океан–континент в районе Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2010. № 4. С. 13–29.

Гонтовая Л.И., Хренов А.П., Степанова М.Ю., Сениюков С.Л. Глубинная модель литосферы в районе Ключевской группы вулканов (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2004. № 3. С. 3–11.

Горбатилов А.В., Степанова М.Ю. Результаты исследований статистических характеристик и свойств стационарности низкочастотных микросейсмических сигналов // Физика Земли. 2008. № 1. С. 57–67.

Горбатилов А.В., Ларин Н.В., Моисеев Е.И., Беляшов А.В. Применение метода микросейсмического зондирования для изучения строения погребенной трубы взрыва // Докл. АН. 2009. Т. 428, № 4. С. 526–530.

Горбатилов А.В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е. Закономерности формирования микросейсмического поля под влиянием локальных геологических неоднородностей и зондирование среды с помощью микросейсм // Физика Земли. 2008. № 7. С. 66–84.

Горбатилов А.В., Цуканов А.А. Моделирование волн Рэлея вблизи рассеивающих скоростных неоднородностей. Изучение возможностей метода микросейсмического зондирования // Физика Земли. 2011. № 4. С. 96–112.

Горбач Н.В., Портнягин М.В. Геологическое строение и петрология лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч // Петрология. 2011. Т. 19, № 2. С. 140–172.

Гордеев Е.И. Сейсмичность вулканов и контроль вулканической активности // Вест. ДВО РАН. 2007. № 2. С. 38–45.

Гордеев Е.И., Гирина О.А. Вулканы и их опасность для авиации // Вест. РАН. 2014. Т. 84, № 2. С. 134–142.

- Гордеев Е.И., Карпов Г.А.** Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 1962–2012. Владивосток: Дальпресс, 2012. 216 с.
- Гордеев Е.И., Карпов Г.А., Аникин Л.П., Кривовичев С.В., Филатов С.К., Антонов А.В., Овсянников А.А.** Алмазы в лавах Трещинного Толбачинского извержения на Камчатке // Докл. АН. 2014. Т. 454, № 2. С. 204–206.
- Гордеев Е.И., Муравьев Я.Д., Самойленко С.Б. и др.** Трещинное Толбачинское извержение 2012–2013 гг. Первые результаты // Докл. АН. 2013. Т. 452, № 5. С. 562–566.
- Гордеев Е.И., Федотов С.А., Чебров В.Н.** Детальные сейсмологические исследования на Камчатке в 1961 – 2011 гг., основные результаты // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 3–17.
- Гордейчик Б.Н., Чурикова Т.Г., Кронц А., Симакин А.Г., Вернер Г.** Fe-Mg и микроэлементная зональность в камчатских оливинах // Вулканизм, биосфера и экологические проблемы: Восьмая Междунар. науч. конф.: сб. матер. Туапсе, 1–6 октября 2016 г. / ред. И.Г. Волкодав. Майкоп; Туапсе: Адыгейский гос. ун-т, 2016. С. 27–29.
- Горельчик В.И., Завьялов А.Д.** Поведение параметра плотности сейсмогенных разрывов при подготовке и развитии Большого трещинного Толбачинского извержения // Вулканология и сейсмология. 1986. № 6. С. 60–66.
- Горельчик В.И., Гарбузова В.Т., Сторчеус А.В.** Глубинные вулканические процессы под Ключевским вулканом по сейсмологическим данным // Вулканология и сейсмология. 2004. № 6. С. 21–34.
- Горшков А.И., Селиверстов А.И., Сивцов А.В., Лапина М.И., Щека С.А.** О первой находке алюминия в карбонадо // Геология руд. месторождений. 1996. Т. 38, № 4. С. 381–383.
- Гребенников А.В., Щека С.А., Карабзов А.А.** Силикатно-металлические сферулы и проблема механизма игнимбритовых извержений (на примере Якутинской вулканотектонической структуры) // Вулканология и сейсмология. 2012. № 4. С. 3–22.
- Гришин С.Ю., Шляхов С.А.** Растительность и почвы Толбачинского дола (Камчатка) // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 2, вып. 14. С. 130–142.
- Гусев А.А., Мельникова В.Н.** Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1990. № 6. С. 55–63.
- Гусев Н.А., Двигало В.Н., Добрынин В.Ф., Магуськин М.А., Селезнев Б.В., Скуридин Ю.Ф., Шкред В.И.** Некоторые результаты экспериментальных исследований по применению фотограмметрического метода для изучения динамических процессов в вулканологии // Вулканология и сейсмология. 1979. № 3. С. 30–37.
- Гущенко И.И.** Извержения вулканов мира. Каталог. М.: Наука, 1979. 476 с.
- Данченко В.Я., Риббин А.В., Штейнберг Г.С.** Рениевая минерализация на Курильских островах // Тихоокеан. геология. 1999. Т. 18, № 4. С. 85–98.
- Данюшевский Л.В., Соболев А.В.** Новые данные по петрологии бонинитов Тонга // Геология и геофизика. 1987. № 12. С. 100–103.
- Двигало В.Н.** Морфологические предвестники (первые признаки) активизации некоторых вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 3–16.
- Двигало В.Н., Свирид И.Ю., Шевченко А.В.** Первые количественные оценки параметров Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. по данным аэрофотограмметрических наблюдений // Вулканология и сейсмология. 2014. № 5. С. 3–11.
- Двигало В.Н., Федотов С.А., Чирков А.М.** Вулкан Плоский Толбачик // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. 1. С. 200–213.
- Двигало В.Н., Чирков А.М., Федотов С.А.** Изменение размеров кратера перед извержением и во время него // Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка 1975–1976. М.: Наука, 1984. С. 81–84.
- Двигало В.Н., Чирков А.М., Федотов С.А.** Новая провальная кальдера Плоского Толбачика // Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка 1975–1976 / отв. ред. С.А. Федотов М.: Наука, 1984. С. 75–84.

- Действующие вулканы Камчатки / ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. М.: Наука, 1991. Т. 1. С. 302; Т. 2. С. 416.
- Добрецов Н.Л. Петрологические и геохимические особенности субдукционного магматизма // Петрология. 2010. № 1. С. 1–24.
- Добрецов Н.Л. Основы тектоники и геодинамики. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2011. 492 с.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г. Моделирование процессов субдукции // Геология и геофизика. 1997. Т. 38, № 5. С. 846–856.
- Добрецов Н.Л., Туркина О.М. Раннедокембрийская история Земли: роль плейт- и плюм-тектоники и космического фактора // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 7.
- Добрецов Н.Л., Буслов М.М., Василевский А.Н., Ветров Е.В. Проблемы тектоники Горного Алтая: полигономодель // Геология и геофизика. 2017.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. 408 с.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А. Геодинамическая и тепловая модели зоны субдукции // Физ. мезомеханика. 2009. Т. 12, № 1. С. 5–16.
- Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Литасов К.Д., Кукарина Е.В. Значение геологии, экспериментальной петрологии и сейсмотомографии для комплексной оценки субдукционных процессов // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 1-2. С. 21–55.
- Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Литасов К.Д. Пути миграции магм и флюидов и составы вулканических пород Камчатки // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 12. С. 1633–1661.
- Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Полянский О.П. Геодинамика, поля напряжений и условия деформаций в различных геодинамических обстановках // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 4. С. 469–499.
- Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Котляров А.В., Кулаков Р.Ю., Карманов Н.С. Физико-химические параметры кристаллизации расплавов в промежуточных надсубдукционных камерах (на примере вулканов Толбачинский и Ичинский, Камчатка) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 7. С. 1265–1291.
- Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46, № 3. С. 22–34.
- Дрознин В.А., Дрознина С.Я. Пространственно-временное распределение землетрясений при Трещинном Толбачинском извержении им. 50-летия ИВиС // Вулканизм и связанные с ним процессы. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2013. С. 185–193.
- Дубик Ю.М., Волынец О.Н. Влияние характера эруптивного процесса на кристаллизацию плагиоклаза // Бюл. вулканол. станций. 1972. № 48. С. 64–70.
- Ермаков В.А. Формационное расчленение четвертичных вулканических пород. М.: Недра, 1977. 223 с.
- Ермаков В.А., Важевская А.А. Вулканы Острый и Плоский Толбачик // Бюл. вулканол. станций. 1973. № 49. С. 43–53.
- Ермаков В.А., Геншафт Ю.С. Механизм извержения Северного прорыва Толбачинского дола в 1975 г. // Докл. АН СССР. 1980. Т. 255, № 5. С. 1076–1080.
- Ермаков В.А., Ермаков А.В. Геолого-петрологические модели извержения 1975–76 гг. на Толбачинском долу (Ключевская группа вулканов) // Геофиз. исследования. М.: ИФЗ РАН, 2006. Вып. 5. С. 53–115.
- Ермаков В.А., Гонтовая Л.И., Сеньюков С.Л. Тектонические условия и магматические источники Нового Толбачинского Трещинного извержения (п-ов Камчатка) // Геофиз. процессы и биосфера. 2014. Т. 3, № 1. С. 5–34.
- Жаринов Н.А., Демянчук Ю.В. Извержение вершинного кратера вулкана Ключевской (Камчатка) в феврале–июле 2007 г. // Вулканология и сейсмология. 2009. № 3. С. 38–49.
- Жаринов Н.А., Еремеев Н.Н. Деформации земной поверхности Ключевского вулкана, предварявшие и сопровождавшие извержение, предсказанное в 1983 г. // Вулканология и сейсмология. 1985. № 1. С. 88–97.

Жаринов Н.А., Энман В.Б., Скуридин Ю.Ф. и др. Об изучении деформаций земной поверхности на Ключевском вулкане (1978–1982 гг.) // Вулканология и сейсмология. 1984. № 4. С. 67–75.

Заварицкий А.Н., Пийп Б.И., Горшков Г.С. Изучение вулканов Камчатки // Тр. лаб. вулканологии. 1954. № 8. С. 18–57.

Золотухин В.В., Симонов В.А., Альмухамедов А.И., Медведев А.Я., Васильев Ю.Р. Сравнительный анализ составов континентальных и океанических платобазальтов // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 12. С. 1335–1344.

Зубин М.И., Таракановский А.А. Тектоника и особенности поля силы тяжести района Ключевской группы вулканов // Глубинное строение, сейсмичность и современная деятельность Ключевской группы вулканов. Владивосток, 1976. С. 17–28.

Иванов Б.В. Типы андезитового вулканизма Тихоокеанского подвижного пояса. М.: Наука, 1990. 213 с.

Иванов Б.В. Андезиты Камчатки: справочник химических анализов вулканитов и основных породообразующих минералов. М.: Наука, 2008. 470 с.

Иванов Б.В., Хренов А.П. Состояние кратеров активнодействующих вулканов Камчатки в 1977–1978 гг. // Вулканология и сейсмология. 1979. № 1. С. 97–101.

Иванов В.В. Вулканическое дрожание как предвестник вершинных извержений Ключевского вулкана на Камчатке и возможный механизм образования дрожания // Матер. конф. «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский, 2011.

Карпов Г.А., Мохов А.В. Акцессорные самородные минералы эруптивных пеплов андезитовых вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2004. № 4. С. 41–49.

Карпов Г.А., Мохов А.В. Микрочастицы самородных металлов, сульфидов и оксидов в андезитовых пеплах Карымского вулкана // Вулканология и сейсмология. 2010. № 3. С. 19–35.

Карпов Г.А., Силаев В.И., Аникин Л.П., Флеров Г.Б., Петровский В.А. Новый генетический тип алмазов в ассоциации с самородными минералами в продуктах Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения–2014). Сыктывкар: Геопринт, 2014. С. 128–131.

Кафтан В.И., Докукин П.А. Определение смещений и деформаций по данным спутниковых геодезических измерений // Геодезия и картография. 2007, № 9. С. 18–22.

Келль Н.Г. О геологических и геодезических материалах Камчатской экспедиции // Изв. Рус. геогр. о-ва. М.-Л., 1925. Т. 57. Вып. 1.

Келль Н.Г. Карта вулканов Камчатки. Л.: Изд. Рус. геогр. о-ва, 1928. 127 с.

Кириенко А.П. Результаты определения горизонтальных деформаций земной поверхности в районе Большого трещинного Толбачинского извержения по материалам угловых и линейных измерений 1971, 1976 и 1977 гг. // Бюл. вулканол. станций. 1979. № 56. С. 63–66.

Кирсанов И.Т., Пономарев Г.П. Извержения вулкана Плоский Толбачик и некоторые особенности их продуктов // Бюл. вулканол. станций. 1974. № 50. С. 53–62.

Коваленко Д.В. Палеомагнетизм геологических комплексов Камчатки и Южной Кореи. Тектоническая и геофизическая интерпретация. М.: Научный мир, 2003. 256 с.

Колесник В.В. С.А. Конради и Камчатская экспедиция 1908–1910 гг. // Немцы в России: русско-немецкие научные и культурные связи. СПб.: Изд. РАН, ИИЕТ, 2000. С. 401–402.

Колосков А.В. Ультраосновные включения и вулканиты как саморегулирующаяся геологическая система. М.: Научный мир, 1999.

Колосков А.В., Давыдова М.Ю., Избеков П.Э., Ананьев В.В., Кандрин А.А. Эволюция состава пород Новых Толбачинских вулканов в ходе извержения 2012–

2013 г. – мантийный контроль в формате «онлайн» // Тихоокеан. геология. 2015. Т. 34, № 5. С. 19–39.

Конради С.А. Доклад общему собранию РГО 2 марта 1911 г. о работах южного подотдела Камчатской экспедиции Ф.Н. Рябушинского, снаряженной РГО // Изв. Гос. Рус. геогр. о-ва. 1925. Т. 57, № 1. С. 5–32.

Косыгин В.Ю., Сеначин В.Н., Лютая Л.М., Ромашова О.Н. Гравитационные аномалии и их связь со строением земной коры и верхней мантии в районе Средних Курил // Тихоокеан. геология. 1986. № 3. С. 74–79.

Крашенинников С.П. Описание земли Камчатки. Т. 1. Санкт-Петербург: Изд-во Имп. Акад. наук, 1755. 438 с.

Кривенко А.П. (ред.) Геохимическая типизация магматических и метаморфических пород Камчатки. Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1990. 258 с.

Кривовичев С.В., Филатов С.К. Кристаллохимия минералов и неорганических соединений с комплексами анионцентрированных тетраэдров. СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 2001. 199 с.

Крук Н.Н. Континентальная кора Горного Алтая: этапы формирования и эволюции, индикаторная роль гранитоидов // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 8. С. 1403–1423.

Кугаенко Ю.А., Волинец А.О. Комплексирование сейсмологических и петрологических данных для развития модели магматической питающей системы извержений Толбачинского дола // Матер. Пятой науч.-техн. конф. «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». 2015. http://www.emsd.ru/conf2015lib/pdf/model/Kugaenko_Volinec.pdf

Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Горбатилов А.В., Степанова М.Ю. Особенности глубинного строения района Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. по данным микросейсмического зондирования // Вулканология и сейсмология. 2013. № 5. С. 23–39.

Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Горбатилов А.В., Степанова М.Ю. Развитие модели глубинного строения средней части Толбачинского дола // Вулканизм и связанные с ним процессы: матер. конф., посвящ. дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2013. С. 212–218.

Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Горбатилов А.В., Степанова М.Ю. Развитие модели района Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии и вулкана Кихпинич (Камчатка) по результатам совместного анализа данных микросейсмического зондирования и локальной геодинамической активности // Физика Земли. 2015а. № 3. С. 89–101.

Кугаенко Ю.А., Титков Н.Н., Салтыков В.А., Воропаев П.В. Анализ подготовки Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. в параметрах сейсмического режима и деформаций земной коры по данным системы комплексного мониторинга активности вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2015б. № 4. С. 40–58.

Кулаков В.С. Гавайский тип вулканов на Камчатке // Природа. 1936. № 10. С. 117–122.

Кулаков И.Ю., Гайна К., Добрецов Н.Л., Василевский А.Н., Бушенкова Н.А. Реконструкции перемещения плит в Арктическом регионе на основе комплексного анализа гравитационных, магнитных и сейсмических аномалий // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 8. С. 1108–1125.

Кулаков И.Ю., Добрецов Н.Л., Бушенкова Н.А., Яковлев А.В. Форма слэбов в зонах субдукции под Курило-Камчатской и Алеутской дугами по данным региональной томографии // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 6. С. 830–851.

Кулаков И.Ю., Кукарина Е.В., Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Верниковский В.А. Магматические источники в мантийном клине под вулканами Ключевской группы и Кизимен (Камчатка) по данным сейсмической томографии // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 1. С. 109–124.

Купенко В.И., Осадчий Е.Г. Самородный алюминий в рудах Никитовского рудного месторождения // Самородное минералообразование в магматическом процессе. Якутск: ЯФСО АН СССР, 1981. С. 87–90.

- Лаверов Н.П., Богатиков О.А., Добрецов Н.Л., Коваленко В.И. (ред.)** Новейший и современный вулканизм на территории России. М.: Наука, 2005. 604 с.
- Лебедев Е.В., Хитаров Н.И.** Начало плавления гранита и электропроводность в зависимости от высокого давления паров воды // Геохимия. 1964. № 3. С. 756–780.
- Левашова Н.М.** Кинематика позднемеловых и мел-палеогеновых энсиматических островных дуг Камчатки: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ГИН РАН, 1999.
- Лобанова Е.В., Макеев В.А., Шевчук С.С.** Типоморфизм гранатов дунит-гарцбургитового, лерцолитового и эклогитового парагенезисов из кимберлитовых трубок Якутской алмазоносной провинции // Модели образования алмаза и его коренных источников, перспективы алмазоносности Украинского щита и сопредельных территорий. Киев: Изд-во «ТОВ ЦПКМПРИНТ», 2012. С. 116–119.
- Лобковский Л.И., Вербицкий В.Е., Кононов М.В., Шрейдер А.А., Гарраш И.А., Соколов С.Д., Тучкова М.И., Котелкин В.Д., Верниковский В.А.** Геодинамическая модель эволюции Арктического региона в позднем мезозое–кайнозое // Арктика. Экология и экономика. 2011. № 1. С. 104–115.
- Луканин О.А., Кадик А.А., Биггар Г.М., Федотов С.А.** Физико-химические условия кристаллизации базальтов Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. // Вулканология и сейсмология. 1980. № 3. С. 16–50.
- Лукин А.Е.** Самородный алюминий в коллекторах нефти и газа // Докл. АН Украины. 2008. № 12. С. 100–107.
- Магуськин М.А., Магуськин В.М.** Вертикальные смещения земной поверхности вдоль протяженных нивелирных трасс в южной зоне Толбачинских шлаковых конусов после окончания БТТИ 1975–1976 гг. и их возможные причины (Камчатка) // Вулканизм и связанные с ним процессы. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2016. С. 210–233.
- Магуськин М.А., Левин В.Е., Бахтиаров В.Ф.** Деформации земной поверхности в районе Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. в период 1978–2000 гг. и их возможные причины // Вулканология и сейсмология. 2003. № 6. С. 55–61.
- Магуськин М.А., Титков Н.Н., Демянчук Ю.В.** О деформациях земной поверхности в районе Северного прорыва Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. на Камчатке // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 1, вып. 21. С. 147–151.
- Мартынов Ю.А., Рыбин А.В., Дриль С.И., Мартынов А.Ю.** Зоны аномального вулканизма Курильских островов, остров Парамушир // Вест. ДВО РАН. 2009. № 4. С. 17–23.
- Мархинин Е.К.** Наблюдения в кратере вулкана Плоский Толбачик 6–8 сентября 1962 г. // Вопр. географии Камчатки. 1964. № 2. С. 110–112.
- Мелекесцев И.В.** Вулканизм и рельефообразование. М.: Наука, 1980. 212 с.
- Мелекесцев И.В.** Сопка Средняя (Ключевская группа вулканов, Камчатка) – гигантский аллохтон, а не самостоятельный вулкан // Вулканология и сейсмология. 2005. № 3. С. 9–14.
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А.** Гигантские обвалы на вулканах // Вулканология и сейсмология. 1984. № 4. С. 14–23.
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Сулержицкий Л.Д., Кожемяка Н.Н., Огородов Н.В., Егорова И.А., Лупикина Е.Г.** Возраст вулканов Курило-Камчатской вулканической области // Вулканизм и глубины Земли. М.: Наука, 1971. С. 68–74.
- Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Эрлих Э.Н., Кожемяка Н.Н.** Вулканические горы и равнины // Камчатка, Курильские и Командорские острова / ред. И.В. Луцицкий М.: Наука, 1974. С. 162–234.
- Мелекесцев И.В., Волюнец О.Н., Ермаков В.А., Кирсанова Т.П., Масуренков Ю.П.** Вулкан Шивелуч // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. Природа вулканических процессов на Камчатке. Вулканы Северной Камчатки и Срединного хребта / ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. М.: Наука, 1991. С. 98–103.

- Мелекесцев И.В., Краевая Т.С., Брайцева О.А.** Рельеф и отложения молодых вулканических районов Камчатки. М.: Наука, 1970. 102 с.
- Мелекесцев И.В., Хренов А.П., Кожемяка Н.Н.** Тектоническое положение и общий очерк вулканов Северной группы и Срединного хребта // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. Природа вулканических процессов на Камчатке. Вулканы Северной Камчатки и Срединного хребта / ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. М.: Наука, 1991. С. 74–84.
- Мельников Ю.Ю.** Пакет программ для определения координат гипоцентров землетрясений Камчатки на ЭВМ // Вулканология и сейсмология. 1990. № 5. С. 103–112.
- Меняйлов А.А.** Состояние вулкана Толбачик в 1946–1948 гг. // Бюл. вулканол. станции. 1953. № 17. С. 41–45.
- Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Шапарь В.Н.** Геохимические особенности эксгаляций Большого трещинного Толбачинского извержения. М.: Наука, 1980.
- Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Шапарь В.Н.** Геохимические особенности вулканических газов // Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка 1975–1975 / ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984.
- Меняйлов И.А., Никитина Л.П., Шапарь В.Н., Литасова С.Н.** Водные вытяжки из пеплов Новых Толбачинских вулканов // Бюл. вулканол. станций. 1979. № 56. С. 149–161.
- Миронов Н.Л., Портнягин М.В.** Содержание H_2O и CO_2 в исходных магмах Ключевского вулкана по данным изучения расплавных и флюидных включений в оливине // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 11. С. 1718–1735.
- Миронов Н.Л., Портнягин М.В., Плечов П.Ю., Хубуная С.А.** Заключительные этапы эволюции магм Ключевского вулкана (Камчатка) по данным изучения расплавных включений в минералах высокоглиноземистых базальтов // Петрология. 2001. Т. 9, № 1. С. 51–69.
- Мороз Ю.Ф.** Электропроводность земной коры и верхней мантии Восточной Камчатки в районе Ключевской группы вулканов // Вулканология и сейсмология. 1985. № 2. С. 84–92.
- Мороз Ю.Ф.** Электропроводность земной коры и верхней мантии Камчатки. М.: Наука, 1991. 181 с.
- Мороз Ю.Ф., Логинов В.А.** Геоэлектрическая модель Толбачинского извержения им. 50-летия Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН // Вулканология и сейсмология. 2016. № 5. С. 21–34.
- Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А.** Глубинные проводящие зоны в области сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг // Физика Земли. 2006. № 6. С. 60–68.
- Муравьев Я.Д., Ашихмина Н.А., Овсянников А.А., Философова Т.М.** Опыт изучения аэрозолей из кратерного ледника вулкана Плоский Толбачик (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2002. № 6. С. 29–35.
- Набоко С.И., Главацких С.Ф.** Постэруптивный метасоматоз и рудообразование. М.: Наука, 1983. 164 с.
- Наумов В.Б., Дорофеева В.А., Гирнис А.В., Ярмолюк В.В.** Сравнение содержаний петрогенных, летучих и редких элементов в расплавах океанических хребтов по данным изучения включений в минералах и закалочных стекол // Геохимия. 2014. № 5. С. 387–405.
- Наумов В.Б., Толстых М.Л., Гриб Е.Н., Леонов В.Л., Кононкова Н.Н.** Химический состав, летучие компоненты и элементы-примеси расплавов Карымского вулканического центра (Камчатка) и вулкана Головнина (о. Кунашир) по данным изучения включений в минералах // Петрология. 2008. Т. 16, № 1. С. 3–20.
- Низкоус И.В., Санина И.А., Гонтовая Л.И., Кисслинг Э.** Скоростные свойства литосферы переходной зоны океан–континент в районе Камчатки по данным сейсмической томографии // Физика Земли. 2006. № 4. С. 18–29.
- Новгородова М.И.** Находка самородного алюминия в кварцевых жилах // Докл. АН СССР. 1978. Т. 248, № 4. С. 965–968.

Новгородова М.И. Самородные металлы в рудах гидротермального генезиса // Самородное минералообразование в магматическом процессе. Якутск, 1981. С. 12–15.

Новгородова М.И., Блохина Н.А., Горшков А.И. Структурно-упорядоченный самородный алюминий в скарнах // Докл. АН СССР. 1981. Т. 256, № 2. С. 445–447.

Новгородова М.И., Генералов М.Е., Главацких С.Ф. Самородный алюминий из газовых возгонов современных вулканов и древних базальтоидных диатрем: сходство состава и генезиса // Докл. АН. 1997. Т. 354, № 4. С. 524–528.

Овсянников А.А., Хренов А.П., Муравьев Я.Д. Современная фумарольная деятельность на вулкане Дальний Плоский // Вулканология и сейсмология. 1985. № 5. С. 97–98.

Огородов Н.В., Кожемяка Н.Н., Важеевская А.А., Огородова А.С. Вулканы и четвертичный вулканизм Срединного хребта Камчатки. М.: Наука, 1972. 191 с.

Озеров А.Ю., Арискин А.А., Бармина Г.С. К проблеме генетических взаимоотношений высокоглиноземистых и высокомагнезиальных базальтов Ключевского вулкана (Камчатка) // Докл. АН. 1996. Т. 350, № 1. С. 104–107.

Озеров А.Ю., Арискин А.А., Кайл Ф., Богоявленская Г.Е., Карпенко С.Ф. Петролого-геохимическая модель генетического родства базальтового и андезитового магматизма вулканов Ключевской и Безымянный, Камчатка // Петрология. 1997. Т. 5, № 6. С. 614–635.

Округин В.М. О рудных минералах Большого трещинного Толбачинского извержения // Вулканология и сейсмология. 1979. № 3. С. 59–70.

Олейников Б.В., Округин А.В., Лесникова П.В. Петрологическое значение находок самородного алюминия в базитах // Докл. АН СССР. 1978. Т. 243, № 1. С. 191–194.

Осоргин Н.Ю. Хроматографический анализ газовой фазы в минералах (методика, аппаратура, метрология). Новосибирск, 1990. 32 с.

Павлов В.М., Абубакиров И.Р. Алгоритм расчета тензора сейсмического момента сильных землетрясений по региональным широкополосным сейсмограммам объемных волн // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2, вып. 20. С. 149–158.

Певзнер М.М. Голоценовый вулканизм Северной Камчатки: пространственно-временной аспект // Докл. АН. 2006. Т. 409, № 5. С. 548–651.

Певзнер М.М., Толстых М.Л., Бабанский А.Д., Леер П., Волынец А.О. Первые данные об изотопном возрасте и составе исходных расплавов пород начальной фазы деятельности вулканического массива Шивелуч, Камчатка // Матер. ежегод. конф., посвящ. Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 105–108.

Перепелов А.В. Кайнозойский вулканизм Камчатки на этапах смены геодинамических обстановок: автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Иркутск: ИГХ СО РАН, 2014. 41 с.

Перепелов А.В., Волынец О.П., Аношин Г.Н., Пузанов Ю.М., Антипин В.С., Каблуков А.В. Калиевый щелочной базальтовый вулканизм Западной Камчатки: геолого-геохимический обзор // Щелочной магматизм и проблема мантийных источников: матер. междунар. семинара. Иркутск, 2001. С. 57–77.

Петров Л.Л., Волынец О.Н., Слеров Г.Б., Андреев В.Н., Андреев В.И., Будников В.А. Распределение фтора, бора и бериллия в породах Толбачинского извержения 1975–1976 гг. // Вулканология и сейсмология. 1979. № 3. С. 18–29.

Пийп Б.И. Активность вулкана Толбачик (январь 1941 г.) // Бюл. вулканол. станции на Камчатке. 1946. № 12. С. 70–73.

Пийп Б.И. Вулкан Толбачик // Бюл. вулканол. станции на Камчатке. 1954. № 20. С. 69–71.

Пийп Б.И. Ключевская сопка и ее извержения в 1944–1945 гг. и в прошлом // Тр. лаб. вулканологии. М., 1956а. Вып. 11. 309 с.

Пийп Б.И. Состояние действующих вулканов Северной Камчатки в 1954 г. // Бюл. вулканол. станции. 1956б. № 24. С. 14–20.

- Пискунов Б.Н.** Геолого-петрологическая специфика вулканизма островных дуг. М.: Наука, 1987. 238 с.
- Плечов П.Ю.** Методы изучения флюидных и расплавных включений, 2014. 266 с.
- Поляк Б.Г., Мелекесцев И.В.** Продуктивность вулканических аппаратов // Вулканология и сейсмология. 1981. № 5. С. 22–37.
- Пономарев Г.П., Пузанков М.Ю.** Распределение породообразующих элементов в системе основной-ультраосновной расплав-шпинель, оливин, ортопироксен, клинопироксен, плагиоклаз по экспериментальным данным: геологическое приложение. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. 668 с.
- Пономарева В.В., Чурикова Т.Г., Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Певзнер М.М., Сулержницкий Л.Д.** Позднеплейстоцен-голоценовый вулканизм Камчатки // Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы / ред. В.И. Коваленко и др. М.: ИГЕМ РАН; ИФЗ РАН, 2008. С. 19–40.
- Попков В.Ф.** Вулканическая деятельность Плоского Толбачика в 1940 г. // Бюл. вулканол. станции на Камчатке. 1946. № 12. С. 54–63.
- Пронин А.А., Серафимова Е.К., Федоров М.Ф.** Активный кратер вулкана Плоский Толбачик в 1965–1966 гг. // Бюл. вулканол. станций. 1970. № 46. С. 26–28.
- Пучков В.Н.** “Великая дискуссия” о плюмах: так кто же все-таки прав? // Геотектоника. 2009. № 1. С. 3–22.
- Рогожин Е.А., Горбатиков А.В., Харазова Ю.В., Степанова М.Ю., Николаев А.В.** Особенности глубинного строения и геологической активности горы Эльбрус и участка ущелья Эльбрус–Тырныауз по комплексу геолого-геофизических данных // Докл. АН. 2016. Т. 471, № 3. С. 350–353.
- Романчев Б.П., Флеров Г.Б.** Температуры лав Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. (Камчатка) // Геохимия. 1980. № 5. С. 688–697.
- Рыбин А.В.** Неоген-четвертичный кислый вулканизм Курильской островной дуги: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук : 04.00.08. Южно-Сахалинск, 1997. 24 с.
- Савельев Д.П.** О продолжении трещинного Толбачинского извержения в феврале–марте 2013 г. // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. Соврем. геол. процессы. 2013. № 1, вып. 21. С. 7–8.
- Салтыков В.А.** Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53–59.
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Воропаев П.В.** Об аномалии сейсмического режима, предвещающей новое (2012 г.) Трещинное Толбачинское извержение на Камчатке // Вестн. КРАУНЦ. 2012. № 2, вып. 20. С. 9–16.
- Самойленко С.Б., Мельников Д.В., Магуськин М.А., Овсянников А.А.** Начало нового Трещинного Толбачинского извержения в 2012 г. // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2, вып. 20. С. 20–22.
- Селиверстов Н.И.** Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. М.: Научный мир, 1998. 161 с.
- Сенюков С.Л.** Мониторинг активности вулканов Камчатки дистанционными средствами наблюдений в 2000–2004 гг. // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 68–78.
- Сенюков С.Л., Дрознина С.Я., Нуждина И.Н., Гарбузова В.Т., Кожевникова Т.Ю.** Исследования активности вулкана Ключевской дистанционными методами с 01.01.2001 г. по 31.07.2005 г. // Вулканология и сейсмология. 2009. № 3. С. 50–59.
- Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дрознина С.Я., Гарбузова В.Т., Кожевникова Т.Ю., Соболевская О.В., Назарова З.А.** Сейсмичность района Плоский Толбачик в 2000–2013 гг. // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Четвертая науч.-техн. конф. Петропавловск-Камчатский. 30 сентября – 4 октября 2013 г. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 103–108.

Сергеев К.Ф., Ким Чун Ун, Кочергин Е.В., Ромашова О.Н. Строение и геодинамические особенности литосферы Курильской островной системы // Строение сейсмофокальных зон. М.: Наука, 1987. С. 29–41.

Сергеев К.Ф., Ким Чун Ун, Ромашова О.Н. О соотношении сейсмичности Курильской островной системы с изостатическим состоянием ее земной коры // Тихоокеан. геология. 1984. № 2. С. 90–93.

Серебрякова Л.И. Методика дифференциального описания деформаций и повторные спутниковые определения // Геодезия и картография. 2014. № 10. С. 47–50.

Сидоров М.Д., Новаков Р.М. Плотностная модель зоны сочленения Камчатской и Алеутской островных дуг // Региональная геология и металлогения. 2014. № 58. С. 59–65.

Силаев В.И., Петровский В.А., Сухарев А.Е., Мартинс М. Новый вклад в минералогию карбонадо: резюме итогов исследований // Геология алмаза – настоящее и будущее. Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 2005. С. 695–704.

Силаев В.И., Филиппов В.Н. Микроминералы и микроминеральные парагенезисы в зонах вторичного гипергенно-инфильтрационного обогащения как новая филогеническая проблема // Микро- и нанодисперсные структуры минерального вещества. Сыктывкар: Геопринт, 1999. С. 82–94.

Силаев В.И., Чайковский И.И., Харитонов Т.В., Филиппов В.Н., Хазов А.Ф. К проблеме атипичных и нетрадиционных минералов-спутников алмаза (на примере Урала). Сыктывкар, 2009. 65 с.

Сильные камчатские землетрясения 2013 г. / под ред. В.Н. Чеброва. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2014. 252 с.

Симонов В.А. Петрогенезис офиолитов (термобарогеохимические исследования). Новосибирск: Изд-во ОИГГМ СО РАН, 1993. 247 с.

Симонов В.А., Колобов В.Ю., Пейве А.А. Петрология и геохимия геодинамических процессов в Центральной Атлантике. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1999. 224 с.

Симонов В.А., Котляров А.В., Ступаков С.И. Условия формирования палеоокеанических базальтовых комплексов Кузнецкого Алатау // Корреляция алтаид и уралид: магматизм, метаморфизм, стратиграфия, геохронология, геодинамика и металлогения. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016. С. 176–178.

Симонов В.А., Пучков В.Н., Приходько В.С., Ступаков С.И., Котляров А.В., Карманов Н.С., Степанов А.С. Физико-химические условия кристаллизации дунитов Нижнетагильского платиноносного массива (Средний Урал) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 6. С. 1106–1134.

Сирин А.Н. О соотношении центрального и ареального вулканизма. М.: Наука, 1968. 196 с.

Сирин А.Н., Фарберов А.И. Извержение вулкана Плоский Толбачик в 1961–1962 гг. // Бюл. вулканол. станций. 1963. № 34. С. 8–11.

Славина Л.Б., Гарагаш И.А., Горельчик В.И., Иванов Б.В., Белянкин Г.А. Скоростное строение и напряженно-деформированное состояние земной коры в районе Ключевской группы вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2001. № 1. С. 49–59.

Славина Л.Б., Пивоварова Н.Б., Сениуков С.Л. Динамика поля скоростей Северной группы вулканов Камчатки и ее связь с процессом развития вулканической активности // Вулканология и сейсмология. 2012. № 2. С. 39–55.

Смирнов В.С. Аномалии естественного электрического поля в районе Новых Толбачинских вулканов // Бюл. вулканол. станций. 1979а. № 56. С. 82–87.

Смирнов В.С. Особенности геоэлектрического разреза района Новых Толбачинских вулканов // Вулканология и сейсмология. 1979б. № 2. С. 21–27.

Собисевич А.Л., Горбатов А.В., Овсяченко А.Н. Глубинное строение грязевого вулкана горы Карабетова // Докл. АН. 2008. Т. 42, № 4. С. 542–546.

Соболев В.С. Образование магм и магматических горных пород // Проблемы петрологии земной коры и верхней мантии. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1976. С. 3–24.

Соболев А.В., Даниушевский Л.В. Доказательство магматической природы H_2O и определение ее содержания в остаточном бонинитовом расплаве // Докл. АН СССР. 1986. Т. 288, № 4. С. 962–965.

Соболев В.С., Соболев Н.В. Проблемы двухстадийного образования коры // Докл. АН СССР. 1975. Т. 224, № 2. С. 435–439.

Соколов С.Д. Аккреционная тектоника: современное состояние проблемы // Геотектоника. 2003. № 1. С. 3–18.

Соловьев А.В. Изучение тектонических процессов в областях конвергенции литосферных плит. Методы трекового и структурного анализа. М.: Наука, 2008. 319 с.

Соловьев А.В., Хоуриган Дж., Брэндон М.Т. Возраст барабской свиты по данным u/rv (SHRIMP) датирования (Срединный хребет, Камчатка) // Стратиграфия. Геология. Корреляция. 2004. Т. 12, № 4. С. 116–117.

Соловьев А.В., Шапиро М.Н., Гарвер Дж. Лесновский тектонический покров, Северная Камчатка // Геотектоника. 2002. Т. 6. С. 45–59.

Стеблов Г.М., Василенко Н.Ф., Прытков А.С., Фролов Д.И., Грекова Т.А. Динамика Курило-Камчатской зоны субдукции по данным GPS // Физика Земли. 2010. № 5. С. 77–82.

Тараканов Р.З. О возможной роли сейсмофокальных зон в формировании и развитии структур островной дуги // Строение сейсмофокальных зон / отв. ред. Ю.М. Пушаровский. М.: Наука, 1987. С. 11–26.

Тараканов Р.З. Скоростные особенности строения верхней мантии области перехода от Азиатского континента к Тихому океану. (Препринт) Южно-Сахалинск: Из-во ИМГиГ ДВО РАН, 1997. 53 с.

Тараканов Р.З., Ким Чун Ун, Сухомлинова Р.И. Закономерности пространственного распределения гипоцентров Курило-Камчатского и Японского регионов и их связь с особенностями геофизических полей // Геофизические исследования зоны перехода от Азиатского континента к Тихому океану. М.: Наука, 1977. С. 67–77.

Таракановский А.А. Ареальный вулканизм Ключевского дола, некоторые особенности строения // Бюл. вулканол. станций. 1978. № 54. С. 61–67.

Таран Ю.А., Покровский Б.Г., Дубик Ю.М. Изотопный состав и происхождение воды в андезитовых магмах // Докл. АН. 1989. Т. 304. С. 440–443.

Тарарин И.А., Багретдинов З.Г., Чубаров В.И. Петрология и рудоносность метаморфических и метасоматических комплексов Центральной и Восточной Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 2015. 302 с.

Тимербаева К.М. Петрология Ключевских вулканов на Камчатке. М.: Наука, 1967. 208 с.

Токарев П.И. О связи вулканической и сейсмической активности в Курило-Камчатской зоне // Тр. лаб. вулканологии АН СССР. 1959. Вып. 17. С. 156–182.

Токарев П.И. О фокальном слое, сейсмичности и вулканизме Курило-Камчатской зоны // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1970. № 3. С. 15–30.

Токарев П.И. Предсказание места и времени начала Большого Толбачинского извержения в июле 1975 г. // Докл. АН СССР. 1976. Т. 229, № 2. С. 439–442.

Токарев П.И. Долгосрочный прогноз извержений вулканов // Вулканология и сейсмология. 1979. № 3. С. 77–90.

Токарев П.И., Зобин В.М. Особенности распространения сейсмических волн близких землетрясений в земной коре и верхней мантии в районе Ключевской группы вулканов Камчатки // Бюл. вулканол. станций. 1970. № 46. С. 17–23.

Токарев П.И., Федотов С.А., Степанов В.В. Прогноз начала и развития извержения // Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка 1975–1976. М.: Наука, 1984. С. 373–388.

Успенский В.С., Шапиро М.Н. Позднечетвертичный ареальный вулканизм хребта Кумроч (Восточная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1984. № 1. С. 57–66.

Федорченко И.А., Титлинов В.С., Скачков П.П., Алексеев В.А. Электромагнитное индукционное зондирование в районе Большого трещинного Толбачинского извержения // Вулканология и сейсмология. 1980. № 2. С. 112–118.

- Федотов С.А. (ред.)** Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка 1975–1976. М.: Наука, 1984. 637 с.
- Федотов С.А.** Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с.
- Федотов С.А., Жаринов Н.А.** Об извержениях, деформациях, сейсмичности Ключевского вулкана (Камчатка) в 1986–2005 гг. и механизме его деятельности // Вулканология и сейсмология. 2007. № 2. С. 3–31.
- Федотов С.А., Балеста С.Т., Двигало В.Н., Разина А.А., Флеров Г.Б., Чирков А.М.** Новые Толбачинские вулканы // Действующие вулканы Камчатки. Т. 2. М.: Наука, 1991. С. 214–274.
- Федотов С.А., Жаринов Н.А., Гонтовая Л.И.** Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным об ее извержениях, землетрясениях, деформациях и глубинном строении // Вулканология и сейсмология. 2010, № 1. С. 3–35.
- Федотов С.А., Жаринов Н.А., Горельчик В.И.** Деформации и землетрясения Ключевского вулкана, модель его деятельности // Вулканология и сейсмология. 1988. № 2. С. 3–42.
- Федотов С.А., Славина Л.Б., Сеньюков С.Л., Кучай М.С.** Сейсмические процессы и перемещение магм, происходившие при Большом трещинном Толбачинском извержением 1975–1976 гг. и Трещинном Толбачинском извержении 2012–2013 гг. // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13, № 3. С. 5–30.
- Федотов С.А., Уткин И.С., Уткина Л.И.** Периферический магматический очаг базальтового вулкана Плоский Толбачик, Камчатка: деятельность, положение и глубина, размеры и их изменения по данным о расходе магм // Вулканология и сейсмология. 2011. № 6. С. 3–20.
- Федотов С.А., Энман В.Б., Никитенко Ю.П., Магуськин М.А. и др.** Геодезические исследования // Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка 1975–1976 / ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. С. 472–513.
- Флеров Г.Б., Мелекесцев И.В.** Извержение 2012–2013 гг. как результат продолжающейся активности Толбачинской региональной зоны шлаковых конусов (Ключевская группа вулканов, Камчатка) // Вулканизм и связанные с ним процессы: регион. науч. конф., посвящ. Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, 29–30 марта 2013 г.: матер. конф. / ред. Е.И. Гордеев. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 139–144.
- Флеров Г.Б., Овсянников А.А.** Вулкан Ушковский // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. Природа вулканических процессов на Камчатке. Вулканы Северной Камчатки и Срединного хребта / ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. М.: Наука, 1991. С. 156–163.
- Флеров Г.Б., Ананьев В.В., Пономарев Г.П.** Петрогенезис пород вулканов Острого и Плоского Толбачика и соотношение вулканических проявлений базальтовой и трахибазальтовой магм на территории Толбачинского дола (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2015. № 3. С. 15–35.
- Флеров Г.Б., Андреев В.Н., Будников В.А., Цюрупа А.И.** Петрология продуктов извержения // Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка 1975–1976 / ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. С. 223–284.
- Флеров Г.Б., Соболев А.В., Колосков А.В., Щербовский Е.Я., Королук В.И.** Пироксены и оливины в породах Большого трещинного Толбачинского извержения 1975–1976 гг. // Вулканология и сейсмология. 1980. № 3. С. 3–15.
- Флеров Г.Б., Чурикова Т.Г., Ананьев В.В.** Вулканический массив Плоских Сопок: геология, петрохимия, минералогия и петрогенезис пород (Ключевская группа вулканов, Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2017. В печати.
- Французова В.И., Данилов К.Б.** Структура трубки взрыва имени М.В. Ломоносова Архангельской алмазоносной провинции по аномалиям микросейсмического поля // Вулканология и сейсмология. 2016. № 5. С. 71–78.
- Хаин В.Е., Филатова Н.И., Полякова И.Д.** Тектоника, геодинамика и перспективы нефтегазоносности Восточно-Арктических морей и их континентальные обрамления. М.: Наука, 2009. 227 с.

Хасегава А., Умино Т., Тагаки А. Двухслойная структура глубинной сейсмической зоны островной дуги Северо-Восточной Японии // Новые данные о строении коры и верхней мантии Курило-Камчатского и Японского регионов. Владивосток, 1978. С. 68–75.

Хитаров Н.И. Экспериментальные исследования вещества в условиях высоких температур и давлений в связи с проблемой изучения земной коры и верхней мантии // Кора и верхняя мантия Земли. Вып. 2. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975. С. 7–17.

Хитаров Н.И., Слуцкий А.Б., Ревин Н.И. Изменение электропроводности базальтов при плавлении в условиях высоких давлений // Физические свойства горных пород при высоких термодинамических параметрах: мат. III Всесоюз. совещ. Киев: Наук. думка, 1971. С. 99–100.

Хренов А.П., Артемьев О.Г., Белоусов А.Б., Васильев В.И., Гирин О.А., Гордеев Е.И., Двигало В.Н., Дрознин В.А., Демянчук Ю.В., Дубровская И.К., Лексин А.Б., Мельников А.В., Муравьев Я.Д., Овсянников А.А., Чирков С.А. Вулканы Камчатки и Курильских островов // Вестн. РФФИ. 2015. № 2. 103 с.

Хренов А.П., Двигало В.Н., Кирсанов И.Т., Федотов С.А., Горельчик В.И., Жаринов Н.А. Вулкан Ключевской // Действующие вулканы Камчатки. Т. 1. Природа вулканических процессов на Камчатке. Вулканы Северной Камчатки и Срединного хребта / ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. М.: Наука, 1991. С. 146–153.

Хубуная С.А., Соболев А.В. Первичные расплавы известково-щелочных магнезиальных базальтов Ключевского вулкана // Докл. АН. 1998. Т. 360, № 1. С. 100–102.

Хубуная С.А., Богоявленский С.О., Новгородцева Т.Ю., Округина А.И. Минералогические особенности магнезиальных базальтов как отражение фракционирования в магматической камере Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1993. № 3. С. 46–68.

Хубуная С.А., Гонтовая Л.И., Соболев А.В., Низкоус И.В. Магматические очаги под Ключевской группой вулканов (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2007. № 2. С. 32–54.

Хубуная С.А., Еремина Т.С., Соболев А.В. Формационная принадлежность калиевых трахиандезитбазальтов побочного извержения 2012–2013 гг. вулкана Плоский Толбачик по геохимическим признакам (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2016. № 1. С. 37–55.

Цуканов А.А., Горбатиков А.В. Метод микросейсмического зондирования: влияние аномальных значений коэффициента Пуассона и оценка величины нелинейных искажений // Физика Земли. 2015. № 4. С. 94–102.

Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. и др. Развитие системы комплексного инструментального мониторинга вулканов Дальневосточного региона // Сейсмические приборы. 2012. Т. 48, № 4. С. 40–54.

Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сеньюков С.Л., Сергеев В.А., Синицин В.И., Шевченко Ю.В., Ящук В.В. Детальные сейсмологические наблюдения на Камчатке. Современное состояние (2011 г.) // Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке / под ред. Е.И. Гордеева, В.Н. Чеброва. Петропавловск-Камчатский: Новая Книга, 2012.

Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сеньюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Ящук В.В. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18–40.

Чебров В.Н., Дрознин Д.В., Сергеев В.А., Пантюхин Е.А. Система сбора, обработки, хранения и представления сейсмологических данных и результатов их обработки в СП СПЦ, технические средства, алгоритмы и ПО // Тр. Второй Регион. науч.-техн. конф. / под ред. В.Н. Чеброва. Петропавловск-Камчатский, 2010. С. 332–336.

Чебров В.Н., Левина В.И., Ландер А.В., Чеброва А.Ю., Сеньюков С.Л., Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Региональный каталог землетрясений Камчатки и

- Командорских островов 1962–2010 гг.: технология и методика создания // Землетрясения Северной Евразии, 2010 год. Обнинск: ГС РАН, 2016. С. 396–406.
- Чурикова Т.Г.** Геохимия и моделирование магматического процесса вулканов Ключевской группы: дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. 155 с.
- Чурикова Т.Г., Соколов С.Ю.** Магматическая эволюция вулкана Плоские Сопки, Камчатка (анализ изотопной геохимии стронция) // Геохимия. 1993. № 10. С. 1439–1448.
- Чурикова Т.Г., Гордейчик Б.Н., Иванов Б.В.** Петрохимия пород вулкана Камень: сравнение с соседними вулканами Ключевской группы // Вулканология и сейсмология. 2012. № 3. С. 23–45.
- Чурикова Т., Дорендорф Ф., Вернер Г.** Природа геохимической зональности вкрест простирапия Камчатской островной дуги // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы / ред. Б.В. Иванов. Петропавловск-Камчатский: ИВГиГ ДВО РАН, 2001. С. 173–190.
- Чурикова Т.Г., Иванов Б.В., Айкельбергер Дж., Вернер Г., Броун Б., Избеков П.** Зональность по макро- и микроэлементам в плагиоклазе вулкана Кизимен (Камчатка) применительно к процессам в магматическом очаге // Вулканология и сейсмология. 2013. № 2. С. 27–47.
- Шанцер А.Е., Шапиро М.Н., Колосков А.В., Челебаева А.И., Синельникова В.Н.** Эволюция структуры Лесновского поднятия и прилегающих территорий в кайнозое (Северная Камчатка) // Тихоокеан. геология. 1985. № 4. С. 66.
- Шарапов В.Н., Кузнецов Г.В., Тимина Т.Ю., Томиленко А.А., Чудненко К.В.** Численное моделирование неизотермического метасоматического преобразования ультрабазитов мантийного клина под Авачинской группой вулканов // Геология и геофизика. 2017. Т. 58, № 5. С. 674–700.
- Штеренберг Л.Е.** Самородные металлы в пемзах (Юго-Восток Камчатки) // Докл. АН. 1997. Т. 355, № 4. С. 520–523.
- Штеренберг Л.Е., Васильева Г.Л.** Самородные металлы и интерметаллические соединения в осадках северо-восточной части Тихого океана // Литология и полезные ископаемые. 1979. № 2. С. 185–191.
- Щербаков В.Д., Плечов П.Ю.** Петрология мантийных ксенолитов в породах вулкана Безымянный (Камчатка) // Докл. АН. 2010. Т. 434, № 6. С. 1–4.
- Щербаков Ю.Г.** Геохимическая классификация элементов // Докл. АН СССР. 1965. Т. 164, № 4. С. 917–920.
- Щербаков Ю.Г.** Периодическая система и космогеохимическое распределение элементов // Геология и геофизика. 1982. № 1. С. 77–87.
- Эрлих Э.Н.** Петрохимия Курило-Камчатской вулканической провинции. М.: Наука, 1966. 276 с.
- Эрлих Э.Н.** Современная структура и четвертичный вулканизм западной части Тихоокеанского кольца. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1973. 244 с.
- Якубова В.В.** Корунд // Минералы. Справочник / под ред. Ф.В. Чухрова, Э.М. Боншдедт-Куплетской. Т. 3. Вып. 2. М.: Наука, 1965. С. 63–75.
- Akinin V.V., Calvert A.T.** Cretaceous mid – crustal metamorphism and exhumation of the Koolen gneiss dome, Chukotka Peninsula, NE Russia // Tectonic evolution of the Bering Shelf – Chukotka Sea – Arctic margin and adjacent land. Ed E.L. Maler, A. Grat, S.L. Klemperer // Geoll. Soc. Amer. Spec. Paper. 2002. P. 147–166.
- Alexeiev D.V., Gaedicke C., Tsukanov N.V., Freitag R.** Collision of the Kronotskiy arc at the NE Eurasia margin and structural evolution of the Kamchatka–Aleutian junction // Int. J. Earth Sci. 2006. Vol. 95, Is. 6. P. 977–993.
- Almeev R.R., Ariskin A.A., Kimura J.-I., Barmina G.S.** The role of polybaric crystallization in genesis of andesitic magmas: Phase equilibria simulations of the Bezymianny volcanic subseries // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2013a. Vol. 263. P. 182–192.
- Almeev R.R., Kimura J.-I., Ariskin A.A., Ozerov A.Y.** Decoding crystal fractionation in calc-alkaline magmas from the Bezymianny Volcano (Kamchatka, Rus-

- sia) using mineral and bulk rock compositions // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2013b. Vol. 263. P. 141–171.
- Almeev R.R. et al.** The effect of H₂O on olivine crystallization in MORB: Experimental calibration at 200 MPa // *Am. Mineral.* 2007. Vol. 92, N 4. P. 670–674.
- Alves S., Schiano P., Allègre C. J.** Rhenium–osmium isotopic investigation of Java subduction zone lavas // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1999. Vol. 168, Is. 1–2. P. 65–77.
- Alves S., Schiano P., Capmas F., Allègre C.J.** Osmium isotope binary mixing arrays in arc volcanism // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2002. Vol. 198, Is. 3–4. P. 355–369.
- Andersen O.B., Knudsen P.** Deriving the DTU15 Global high resolution marine gravity field from satellite altimetry // Abstract from ESA Living Planet Symposium 2016, Prague, Czech Republic, 2016.
- Andersen O.B., Knudsen P., Berry P.** The DNSC-08 GRA global marine gravity field from double reprocessed satellite altimetry // *J. Geodesy.* 2010. Vol. 84, N 8.
- Andersen O.B., Knudsen P., Kenyon S., Holmes S.** Global and arctic marine gravity field from recent satellite altimetry ДТИ-13. 76 European Ass. Geodesy Engin. SPE – Europec, 2014. P. 3049–3053.
- Ariskin A.A.** Phase equilibria modeling in igneous petrology: use of COMAG-MAT model for simulating fractionation of ferro-basaltic magmas and the genesis of high-alumina basalt // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1999. Vol. 90, Is. 1–2. P. 115–162.
- Ariskin A.A., Barmina G.S., Ozerov A.Yu. et al.** Genesis of high-alumina basalts from Klyuchevskoi volcano // *Petrology.* 1995. Vol. 3, N 5. P. 496–521.
- Auer S., Bindeman I., Wallace P., Ponomareva V., Portnyagin M.** The origin of hydrous, high- $\delta^{18}\text{O}$ voluminous volcanism: diverse oxygen isotope values and high magmatic water contents within the volcanic record of Klyuchevskoy volcano, Kamchatka, Russia // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2009. Vol. 157, Is. 2. P. 209–230.
- Avdeiko G.P., Savelyev D.P., Palueva A.A., Popruzhenko S.V.** Evolution of the Kurile-Kamchatkan Volcanic Arcs and Dynamics of the Kamchatka-Aleutian junction. (2007), *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region* / J. Eichelberger, E. Gordeev, P. Izbekov, J. Lees editors // *Geophysical Monograph* 173. American Geophysical Union, Washington, DC, 2007. P. 41–60.
- Bahr K.** Interpretation of magnetotelluric impedance tensor: regional, induction and local telluric distortion // *J. Geophys.* 1988. P. 119–127.
- Bailey J.C.** Role of subducted sediments in the genesis of Kuril-Kamchatka island arc basalts: Sr isotopic and elemental evidence // *Geochem. J.* 1996. Vol. 30. P. 289–321.
- Baranov B., Wong H.K., Dozorova K. et al.** Opening geometry of the Kurile Basin (Okhotsk Sea) as inferred from structural data // *The Island Arc.* 2002. Vol. 11. P. 206–219.
- Barnes G.L.** Origin of the Japanese islands: The new big pictures // *Jap. Rev.* 2003. Vol. 15. P. 3–50.
- Belousov A., Belousova M., Edwards B., Volynets A., Melnikov D.** Overview of the precursors and dynamics of the 2012–13 basaltic fissure eruption of Tolbachik Volcano, Kamchatka, Russia // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2015. Vol. 307. P. 22–37. doi:10.1016/j.jvolgeores.2015.04.009
- Belousov A., Belousova M., Miller T.** Kurile Islands // In *Encyclopedia of Islands* / eds. R.G. Gillespie, D.A. Clague. University of California Press, 2009. P. 520–525.
- Bensen G.D., Ritzwoller M.H., Barmin M.P., Levshin A.L., Lin F., Moschetti M.P., Shapiro N.M., Yang Y.** Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements // *Geophys. J. Int.* 2007. Vol. 169. P. 1239–1260, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03374.x.
- Bijwaard H., Spakman W., Engdahl E.R.** Closing the gap between regional and global travel time tomography // *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 1998. Vol. 103. B. 12. P. 30055–30078.
- Billen M.I.** Modeling the dynamics of subducting slabs // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2008. Vol. 36. P. 325–356.
- Bindeman I.N., Davis A.M.** Trace element partitioning between plagioclase and melt: investigation of dopant influence on partition behavior // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2000. Vol. 64, Is. 16. P. 2863–2878.

Bindeman I.N., Davis A.M., Drake M.J. Ion microprobe study of plagioclase-basalt partition experiments at natural concentration levels of trace elements // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1998. Vol. 62. P. 1175–1193

Bindeman I.N., Eiler J.M., Yogodzinski G.M., Tatsumi Y., Stern C.R., Grove T.L., Portnyagin M., Hoernle K., Danyushevsky L.V. Oxygen isotope evidence for slab melting in modern and ancient subduction zones // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2005. Vol. 235, Is. 3–4. P. 480–496.

Bindeman I.N., Leonov V.L., Izbekov P.E., Ponomareva V.V., Wats K.E., Shipley N.K., Perepelov A.V., Bazanova L.I., Jicha B.R., Singer B.S., Schmitt A.K., Portnyagin M.V., Chen C.H. Large-volume silicic volcanism in Kamchatka. Ar-Ar and U-pbages, isotopic and geochemical characteristics of major pre-holocene culdera-forming eruptions // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2010. Vol. 189, N 1. P. 57–80.

Bindeman I.N., Ponomareva V.V., Bailey J.C., Valley J.W. Volcanic arc of Kamchatka: a province with high- $\delta^{18}\text{O}$ magma sources and large-scale $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ depletion of the upper crust // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2004. Vol. 68, Is. 4. P. 841–865.

Blundy J., Cashman K., Humphreys M. Magma heating by decompression-driven crystallization beneath andesite volcanoes // *Nature*. 2006. Vol. 443, N 7107. P. 76–80.

Bonvalot S., Balmino G., Briais A., Kuhn M., Peyrefitte A., Vales N., Biancale R., Gabalda G., Moreauc G., Reinguin F., Sarraih M., Map. Freair anomaly on the Earth's surface World Gravity Map (WGM-2012). Paris UNESCO-Commission.

Borisov A.A., Shapkin A.I. A new empirical equation rating $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ in magmas to their composition, oxygen fugacity, and temperature // *Geochem. Int.* 1990. Vol. 27, N 1. P. 111–116.

Botcharnikov R.E., Almeev R.R., Koepke J., Holtz F. Phase Relations and Liquid Lines of Descent in Hydrous Ferrobasalt—Implications for the Skaergaard Intrusion and Columbia River Flood Basalts // *J. Petrology*. 2008. Vol. 49, Is. 9. P. 1687–1727.

Bottinga Y., Weill D.F. The viscosity of magmatic silicate liquids; a model calculation // *Am. J. Sci.* 1972. Vol. 272, N 5. P. 438–475.

Braitseva O.A., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D. Ages of calderas, large explosive craters and active volcanoes in the Kuril-Kamchatka region, Russia // *Bull. Volcanol.* 1995. Vol. 57, Is. 6. P. 383–402.

Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D., Melekestsev I.V., Bailey J. Holocene Key-Marker Tephra Layers in Kamchatka, Russia // *Quaternary Res.* 1997. Vol. 47, Is. 2. P. 125–139.

Braitseva O.A., Sulerzhitsky L.D., Litasova S.N., Melekestsev I.V., Ponomareva V.V. Radiocarbon dating and tephrochronology in Kamchatka // *Radiocarbon*. 1993. Vol. 35, Is. 3. P. 463–476.

Brenguier F., Shapiro N. M., Campillo M., Ferrazzini V., Duputel Z., Coustant O., Nercissian A. Towards forecasting volcanic eruptions using seismic noise // *Nature Geosci.* 2008. Vol. 1, Is. 2. P. 126–130.

Bryant J.A., Yogodzinski G.M., Churikova T.G. High-Mg# andesitic lavas of the Shisheisky Complex, Northern Kamchatka: implications for primitive calc-alkaline magmatism // *Contribut. Mineral. Petrol.* 2011. Vol. 161, Is. 5. P. 791–810.

Bryant J.A., Yogodzinski G.M., Churikova T.G. Melt-mantle interactions beneath the Kamchatka arc: Evidence from ultramafic xenoliths from Shiveluch volcano // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2007. Vol. 8, Is. 4. P. 1–24.

Calabrese S., Aiuppa A., Allard P., Bagnato E., Bellomo S., Brusca L., D'Alessandro W., Parelo F. Atmospheric sources and sinks of volcanogenic elements in a basaltic volcano (Etna, Italy) // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2011. Vol. 75. P. 7401–7425. doi:10.1016/j.gca.2011.09.040

Calkins J.A. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of Khapitsa plateau and Studyonaya river basalts and basaltic andesites in Central Kamchatka depression, Kamchatka, Russia // Linkages among tectonics, seismicity, magma genesis, and eruption in volcanic arcs. IV international biennial workshop on subduction processes emphasizing the Japan–Kuril–Kamchatka–Aleutian arcs. Petropavlovsk-Kamchatsky, August 21–27, 2004 / Ed. E.I. Gordeev. Petropavlovsk-Kamchatsky: IViS FEB RAS, 2004. P. 53–54.

- Carniel R.** Neural networks and dynamical system techniques for volcanic tremor analysis // *Ann. Geophys.* 1996. Vol. 39. P. 241–252.
- Carrara E., Rappolla A., Jacobucci F., Pinna E.** Summary Report on the 1974 Etna Eruption *Inst. Internationale di Vulcanologie*, 1974. 65 p.
- Cashman K.V.** Relationship between plagioclase crystallization and cooling rate in basaltic melts // *Contribut. Mineral. Petrol.* 1993. Vol. 113, N 1. P. 126–142.
- Castro A., Gerya T.V.** Magmatic implications of the wedge plumes; experimental study // *Lithos.* 2008. Vol. 103. P. 138–148.
- Caudron C., Taisne B., Kugaenko Yu., Saltykov V.** Magma migration at the onset of the 2012–13 Tolbachik eruption revealed by Seismic Amplitude Ratio Analyses // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2015. Vol. 307. P. 60–67.
- Chaplygin I.V., Lavrushin V.Y., Dubinina E.O.** Geochemistry of volcanic gas at the 2013–13 New Tolbachik eruption, Kamchatka // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2016. Vol. 323. P. 186–193.
- Chevrier R.M., Le Guern F.** Prélèvement et analyses des condensats de fumerolles sur volcans actifs: Soufrière de la Guadeloupe (1976–1977) et Pouzzoles et Vulcano (Italie) (1978) // *Bull. Volcanol.* 1982. Vol. 45. P. 173–178. doi:10.1007/BF02597727
- Chouet B.A.** Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting // *Nature.* 1996. Vol. 380. P. 309–316.
- Churakov S.V., Tkachenko S.I., Korzhinskii M.A., Bocharnikov R.E., Shmulovich K.I.** Evolution of composition of high-temperature fumarolic gases from Kudryavy Volcano, Iturup, Kuril Islands: the thermodynamic modeling // *Geochem. Int.* 2000. Vol. 38. P. 436–451.
- Churikova T.G., Gordeychik B.N., Edwards B.R., Ponomareva V.V., Zelenin E.A.** The Tolbachik volcanic massif: A review of the petrology, volcanology and eruption history prior to the 2012–2013 eruption // *J. Volcanol. Geother. Res.* 2015a. Vol. 307. P. 3–21.
- Churikova T.G., Gordeychik B.N., Iwamori H., Nakamura H., Ishizuka O., Nishizawa T., Haraguchi S., Miyazaki T., Vaglarov B.S.** Petrological and geochemical evolution of the Tolbachik volcanic massif, Kamchatka, Russia // *J. Volcanol. Geother. Res.* 2015b. Vol. 307. P. 156–181.
- Churikova T.G., Gordeychik B.N., Ivanov B.V., Wörner G.** Relationship between Kamen Volcano and the Klyuchevskaya group of volcanoes (Kamchatka) // *J. Volcanol. Geother. Res.* 2013. Vol. 263. P. 3–21.
- Churikova T., Dorendorf F., Wörner G.** Sources and Fluids in the Mantle Wedge below Kamchatka, Evidence from Across-arc Geochemical Variation // *J. Petrol.* 2001. Vol. 42, Is. 8. P. 1567–1593.
- Churikova T., Wörner G., Mironov N., Kronz A.** Volatile (S, Cl and F) and fluid mobile trace element compositions in melt inclusions: implications for variable fluid sources across the Kamchatka arc // *Contribut. Mineral. Petrol.* 2007. Vol. 154, Is. 2. P. 217–239.
- Clark S.R., Stegman D., Mukker R.D.** Episodicity in back-arc tectonic regimes // *Phys. Earth., Planet Inter.* 2008. Vol. 171. P. 265–279.
- Cloos M.** Lithospheric buoyancy and collisional orogenesis: Subduction of oceanic plateaus, continental margins, island arcs, spreading ridges, and seamounts // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1993. Vol. 105, N 6. P. 715–737.
- Cortes J.A., Wilson M., Condliffe E., Francalanci L.** The occurrence of forsterite and highly oxidizing conditions in basaltic lavas from Stromboli volcano, Italy // *J. Petrol.* 2006. Vol. 47, N 7. P. 1345–1373.
- Daly R.A.** The nature of volcanic action // *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences* // *Am. Acad. Arts & Sci.* 1911. Vol. 47, N 3. P. 47–122.
- Danyushevsky L.V.** The effect of small amounts of H₂O on crystallisation of mid-ocean ridge and backarc basin magmas // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2001. Vol. 110, N 3. P. 265–280.
- Danyushevsky L.V., Plechov P.** Petrolog3: Integrated software for modeling crystallization processes // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2011. Vol. 12. P. Q07021.

Danyushevsky L.V., McNeill A.W., Sobolev A.V. Experimental and petrological studies of melt inclusions in phenocrysts from mantle-derived magmas: an overview of techniques, advantages and complications // *Chem. Geol.* 2002. Vol. 183, N 1. P. 5–24.

Davaille A., Lees J.M. Thermal modeling of subducted plates: tear and hotspot at the Kamchatka corner // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2004. Vol. 226, Is. 3–4. P. 293–304.

Del Moro S., Renzulli A., Landi P., La Felice S., Rosi M. Unusual lapilli tuff ejecta erupted at Stromboli during 15 March 2007 explosion shed light on the nature and thermal state of rocks forming the crater system of the volcano // *J. Volcanol. Geother. Res.* 2013. Vol. 254. P. 37–52.

De Mets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S. Current plate motions // *Geophys. J. Int.* 1990. Vol. 101, Is. 2. P. 425–478.

De Paolo D.J. Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1981. Vol. 53, Is. 2. P. 189–202.

De Paolo D.J., Wasserburg G.J. Inferences about magma sources and mantle structure from variations of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ // *Geophys. Res. Lett.* 1976. Vol. 3, Is. 12. P. 743–746.

Diefenbach A., Guffanti M., Ewert J. Chronology and references of volcanic eruptions and selected unrest in the United States, 1980–2008. Open-File Report 2009–1118. U.S. Geological Survey. 2009. 85 p.

Dimalanta C., Taira A., Yumul G.P., Tokuyama H., Mochizuki K. New Rates of Western Pacific island arc magmatism from seismic and gravity data // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2002. Vol. 202. P. 105–115.

Dobretsov N.L., Kirdyashkin A.G. Subduction zone dynamics: models of an accretional wedge // *Otioliti.* 1992. Vol. 17. P. 155–164.

Dorendorf F., Wiechert U., Wörner G. Hydrated sub-arc mantle: a source for the Kluchevskoy volcano, Kamchatka/Russia // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2000. Vol. 175, Is. 1–2. P. 69–86.

Dorn R.I. Cation-ratio dating: a new rock varnish age-determination technique // *Quaternary Res.* 1983. Vol. 20, N 1. P. 49–73.

Dosseto A., Bourdon B., Joron J.-L., Dupré B. U-TH-PA-RA study of the Kamchatka arc: new constraints on the genesis of arc lavas // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2003. Vol. 67, Is. 15. P. 2857–2877.

Dosseto A., Turner S. Reappraisal of uranium-series isotope data in Kamchatka lavas: implications for continental arc magma genesis // *Geol. Soc., London, Spec. Publ.* 2014. Vol. 385, Is. 1. P. 103–116.

Droznin D., Shapiro N., Droznina S.Y., Senyukov S., Chebrov V., and Gordееv E. Detecting and locating volcanic tremors on the klyuchevskoy group of volcanoes (Kamchatka) based on correlations of continuous seismic records // *Geophys. J. Int.* 2015. Vol. 203. P. 1001–1010.

Duretz T., Gerya T.V., May D.A. Numerical modelling of spontaneous slab breakoff and subsequent topographic response // *Tectonophysics.* 2011. Vol. 502. P. 244–256.

Dvigalo V., Shevchenko A., Svirid I. Photogrammetric survey in volcanology: a case study for Kamchatka active volcanoes // *Updates in Volcanology. From volcano modeling to volcano geology* / Ed. Caroly Nemeth. INTECH. 2016. Chapter 3. P. 55–79.

Edwards B.R., Belousov A., Belousova M. Propagation style controls lava–snow interactions // *Nature Commun.* 2014. Vol. 5. P. 5666.

Edwards B.R., Belousov A., Belousova M., Melnikov D. Observations on lava, snowpack and their interactions during the 2012–13 Tolbachik eruption, Klyuchevskoy Group, Kamchatka, Russia // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2015. Vol. 307. P. 107–119.

Eichelberger J., Gordееv E., Izbekov P., Kasahara M., Lees J. (Eds) *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region.* Washington, DC: American Geophysical Union, 2007. 369 p.

Engdahl E.R., Sohlz C.H. Adouble Benioff zone beneath the central Aleutians: an unbending of the lithosphere // *Geophys. Res. Lett.* 1977. Vol. 4, N 10. P. 473–476.

Engebretson D.C., Cox A., Gordon R.G. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basin // *Geol. Soc. Am. Spec. Papers*. 1985. Vol. 206. P. 1–60.

Faley S.F., Barth M.G., Jenner G.A. Rutile/melt partition coefficient for trace elements and an assessment on the influence of rutile on the trace element characteristics of subduction zone magmas // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2000. Vol. 64. P. 933–938.

Fascenda M., Gerya T.V., Burlini L. Deep slab hydration induced by bending-related variation in tectonic pressure // *Nature Geosci.* 2009. Vol. 2. P. 790–799.

Fedotov S.A., Markhinin Y.K. (Eds.) The Great Tolbachik Fissure Eruption: Geological and Geophysical Data 1975–1976. Cambridge: Cambridge: Cambridge University Press, 1983. 364 p.

Foley S.F., Barth M.G., Jenner G.A. Rutile/melt partition coefficients for trace elements and an assessment of the influence of rutile on the trace element characteristics of subduction zone magmas // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2000. Vol. 64. P. 933–938.

Ford C.E. et al. Distribution coefficients of Mg^{2+} , Fe^{2+} , Ca^{2+} and Mn^{2+} between olivine and melt // *J. Petrol.* 1983. Vol. 24. P. 256–265.

Förste C., Bruinsma S.L., Abrikosov O., Lemoine J.-M., Schaller T., Götze H.-J., Ebbing J., Marty J.C., Flechtner F., Balmino G., Biancale R. EIGEN-6C4 The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse; presented at the 5th GOCE User Workshop, Paris, 25–28 November 2014.

Frischnecht P.C. Fields about an oscillating dipole // *Colorado School of Mines*. 1967. Vol. 62, N 326. 78 p.

Frezzotti M.L., Peccerillo A., Panza G. Carbonate metasomatism and CO_2 lithosphere–asthenosphere degassing beneath the Western Mediterranean: An integrated model arising from petrological and geophysical data // *Chem. Geol.* 2009. Vol. 262. P. 108–120.

Fukao Y., Obayashi M., Nakakuki T. Stagnant slab: a review // *Ann. Rev. Earth and Planet. Sci.* 2009. Vol. 37. P. 19–46.

Geist E.L., Scholl D.W. Large-scale deformation related to the collision of the Aleutian Arc with Kamchatka // *Tectonics*. 1994. Vol. 13, Is. 3. P. 538–560.

Geochemical Earth Reference Model (GERM) Partition Coefficients Database. Webservices and Database Support by the San Diego Supercomputer Center, 2017. <http://earthref.org/KDD/>.

GEOROC <http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>

Gerlach T.M. Volcanic sources of tropospheric ozone-depleting trace gases // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2004. Vol. 5. P. 1–16. doi:10.1029/2004GC000747

Gerya T. Future directions in subduction modeling // *J. Geodyn.* 2011. Vol. 52, N 5. P. 344–378.

Giggenbach W.F. Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1992. Vol. 113. P. 495–510. doi:10.1016/0012-821X(92)90127-H

Gilichinsky M., Melnikov D., Melekestsev I., Zaretskaya N., Inbar M. Morphometric measurements of cinder cones from digital elevation models of Tolbachik volcanic field, central Kamchatka // *Can. J. Remote Sensing*. 2010. Vol. 36, Is. 4. P. 287–300.

Ginibre C., Woerner G., Kronz A. Minor- and trace-element zoning in plagioclase: implications for magma chamber processes at Paríacota volcano, northern Chile // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2002. Vol. 143. P. 300–315.

Gonzalez P.J., Samsonov S.V., Pepe S. et al. Magma storage and migration associated with the 2011–2012 El Hierro eruption: implications for crustal magmatic systems at oceanic island volcanoes // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2013. Vol. 118, N 8. P. 4361–4377.

Gorbach N., Portnyagin M., Tembrel I. Volcanic structure and composition of Old Shiveluch volcano, Kamchatka // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2013. Vol. 263. P. 193–208.

Gorbatikov A.V., Montesinos F.G., Arnoso J., Stepanova M.Y., Benavent M., Tsukanov A.A. New Features in the Subsurface Structure Model of El Hierro Island (Canaries) from Low-Frequency Microseismic Sounding: An Insight into the 2011 Seismo-Volcanic Crisis // *Surv. Geophys.* 2013. Vol. 34, Is. 4. P. 463–489.

Gorbatov A., Dominguez J., Suarez G., Kostoglodov V., Zhao D., Gordeev E. Tomographic imaging of the P-wave velocity structure beneath the Kamchatka peninsula // *Geophys. J. Int.* 1999. Vol. 137, N 2. P. 269–279.

Gorbatov A., Fukao Y., Widiyantoro S., Gordeev E. Seismic evidence for a mantle plume oceanwards of the Kamchatka-Aleutian trench junction // *Geophys. J. Int.* 2001. Vol. 146, N 2. P. 282–288, doi:10.1046/j.0956-540x.2001.01439.x.

Gorbatov A., Kostoglodov V., Suárez G., Gordeev E. Seismicity and structure of the Kamchatka Subduction Zone // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 1997. Vol. 102, Is. B8. P. 17883–17898.

Gordeev E.I., Droznin V.A., Dubrovskaya I.K. et al. Fissure Eruption on Tolbachik Dol (FTE-50, Kamchatka, 2012–2013) // 8-th Biennial Workshop on Japan-Kamchatka-Alaska Subduction Processes: Finding clues for science and disaster mitigation from International collaboration (JKASP-2014). <http://hkdrcep.sci.hokudai.ac.jp/map/jkasp2014/proglist.html>.

Gordeev E.I. et al. The Tolbachik fissure eruption of 2012–2013: Preliminary results // *Doklady Earth Sci.* 2013a. P. 1046–1050.

Gordeev E.I., Muravyov Ya.D., Samoylenko S.B. et al. First results from the 2012–2013 Tolbachik fissure eruption // *Bull. Volcanol. Soc. Jap.* 2013b. Vol. 58, N 2. P. 1–8.

Gorelchik V.I., Shirokov V.A., Firstov P.P., Chubarova O.S. Shiveluch volcano: seismicity, deep structure and forecasting eruptions (Kamchatka) // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1997. Vol. 78, Is. 1. P. 121–137.

Graeber F.M., Asch G. Three-dimensional models of P wave velocity and P- to- S velocity ratio in the southern central Andes by simultaneous inversion of local earthquake data // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 1999. Vol. 104 (B9). P. 20237–20256.

Grand S.P. Mantle shear-wave tomography and the fate of subducted slabs // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.* 2002. V. 360, N 1800. P. 2475–2491.

Grandin R., Jacques E., Nercessian A. et al. Seismicity during lateral dike propagation: Insights from new data in the recent Manda Hararo–Dabbahu rifting episode (Afar, Ethiopia) // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2012. Vol. 12. Q0AB08. P. 1–24. doi:10.1029/2010GC003434.

Grapenthin R., Freymueller J.T., Serovetnikov S.S. Surface deformation of Bezymianny Volcano, Kamchatka, recorded by GPS: The eruptions from 2005 to 2010 and long-term, long-wavelength subsidence // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2013. Vol. 263. P. 58–74.

Grove T.L., Chatterjecc N., Parman S.W., Medard E. The influence of H₂O on mantle wedge melting // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2006. Vol. 249. P. 74–89.

Hacker B.R., Peacock S.M., Abers G.A., Holloway S.D. Subduction factory 2. Are intermediate-depth earthquakes in subducting slabs linked to metamorphic dehydration reactions // *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 108. P. 2030, doi:10.1029/2001JB001129, B1.

Halmer M.M., Schmincke H.U., Graf H.F. The annual volcanic gas input into the atmosphere, in particular into the stratosphere: a global data set for the past 100 years // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2002. Vol. 115. P. 511–528.

Hammer J.E. Influence of fO₂ and cooling rate on the kinetics and energetic of Fe-rich basalt crystallization // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2006. Vol. 248. P. 618–637.

Hasegawa A., Nakajima J., Uchida N., Okada., Zhao D., Matsuzawa T., Umino N. Plate subduction and generation of earthquakes and magmas in Japan as inferred from seismic observation: an overview // *Gondwana Res.* 2009. Vol. 16, N 3. P. 370–400.

Henderson P. Inorganic geochemistry. Oxford: Pergamon Press, 1982. 367 p.

Hirahara Y., Takahashi T., Miyazaki T., Vaglarov B.S., Chang Q., Kimura J.-I., Tatsumi Y. Precise Nd isotope analysis of igneous rocks using cation exchange

- chromatography and thermal ionization mass spectrometry (TIMS) // JAMSTEK Report of Research and Development. 2009. Special Issue. P. 65–72.
- Hochstaedter A.G., Kepezhinskas P., Defant M., Drummond M., Koloskov A.** Insights into the volcanic arc mantle wedge from magnesian lavas from the Kamchatka arc // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 1996. Vol. 101, Is. B1. P. 697–712.
- Hofmann A.W.** Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1988. Vol. 90, Is. 3. P. 297–314.
- Horda S., Gerya T.V., Zhu G.A.** A simple three-dimensional model of thermos-chemical convection in the mantle wedge // *Earth Sci. Lett.* 2010. Vol. 290. P. 311–318.
- Hourigan J.R., Brandon M.T., Soloviev A.V., Kirmasov A.B., Garver J.I., Stevenson J., Reiners P.W.** Eon arc-continent collision and crustal consolidation in Kamchatka, Russian Far East // *Amer. J. Sci.* 2009. Vol. 309. P. 333–396.
- Ionov D.A., Benard A., Plechov P.Y.** Melt evolution in subarc mantle: evidence from heating experiments on spinel-hosted melt inclusions in peridotite xenoliths from the andesitic Avacha volcano (Kamchatka, Russia) // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2011. Vol. 162, N 6. P. 1159–1174.
- Ionov D.A., Bénard A., Plechov P.Y., Shcherbakov V.D.** Along-arc variations in lithospheric mantle compositions in Kamchatka, Russia: First trace element data on mantle xenoliths from the Klyuchevskoy Group volcanoes // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2013. Vol. 263. P. 122–131.
- Ishikawa T., Tera F., Nakazawa T.** Boron isotope and trace element systematics of the three volcanic zones in the Kamchatka arc // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2001. Vol. 65, Is. 24. P. 4523–4537.
- Ishizuka O., Geshi N., Itoh J. et al.** The magmatic plumbing of the submarine Hachijo NW volcanic chain, Hachijojima, Japan: long-distance magma transport? // *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. B08S08. <http://dx.doi.org/10.1029/2007JB005325>.
- Ivanov B.V.** The Kamchatka volcano logical station and its part in the development of Soviet volcanology // *The Great Tolbachik Fissure Eruption: Geological and Geophysical Data 1975–1976* / Eds. S.A. Fedotov, Y.K. Markhinin. Cambridge: Cambridge University Press, 1983. P. 1–8.
- Ivanov I., Koulakov I., West M., Jakovlev A., Gordeev E., Senyukov S., Cherebrov V.** Magma source beneath the Klyuchevskoy and Bezymianny volcanoes inferred from local earthquake seismotomography // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2016. Vol. 323, N 1. P. 62–71, doi:10.1016/j.jvolgeores.2016.04.010
- Iverson R.M., Dzurisin D., Gardner C.A., Gerlach T.M., LaHusen R.G., Lisowski M., Major J.J., Malone S.D., Messerich J.A., Moran S.C.** Dynamics of seismogenic volcanic extrusion at Mount St. Helens in 2004–05 // *Nature*. 2006. Vol. 444. P. 439–443.
- Iwasaki T., Levin V., Nikulin A., Iidaka T.** Constraints on the Moho in Japan and Kamchatka // *Tectonophysics*. 2013. Vol. 609. P. 184–201.
- Izbekov P., Koloskov A., Maximov A., Khabunaya S.** The 2012 Fissure Tolbachik eruption: preliminary results of petrological investigation // *Geophys. Res. Abstracts*. 2014. Vol. 16. EGU General Assembly, Vienna. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2014/EGU2014-11710.pdf>.
- Jaggard T.A.** Magmatic gases // *Am. J. Sci.* 1940. Vol. 238. P. 313–353.
- Jaxybulatov K., Koulakov I., Ibs-von Seht M., Klinge K., Reichert C., Dahren B., Troll V.R.** Evidence for high fluid/melt content beneath Krakatau volcano (Indonesia) from local earthquake tomography // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2011. Vol. 206, N 3–4. P. 96–105. doi:10.1016/j.jvolgeores.2011.06.009.
- Jaxybulatov K., Koulakov I., Dobretsov N.L.** Segmentation of the Izu-Bonin and Mariana plates based on the analyses of the Benioff seismicity distribution and regional tomography results // *Solid Earth*. 2013. Vol. 4. P. 14–15, doi 10.5194/se-4-1-013.
- Johnson M.C., Anderson A.T.Jr., Rutherford M.J.** Pre-eruptive volatile contents of magmas // *Volatiles in magmas. Reviews in Mineralogy* / Eds. M.R. Carroll, J.R. Holloway // *Mineral. Soc. Amer. Washington*. 1994. Vol. 30. P. 281–330.

Karandashev V.K., Turanov, A.N., Orlova T.A., Lezhnev A.E., Nosenko S.V., Zolotareva N.I., Moskvitina I.R. Use of the inductively coupled plasma mass spectrometry for element analysis of environmental objects // *Inorg. Materials*. 2008. Vol. 44. P. 1491–1500.

Kasatkina E., Koulakov I., West M., Izbekov P. Structure of magma reservoirs beneath the Redoubt volcano inferred from local earthquake tomography // *J. Geophys. Res.* 2014. Vol. 119, N 6. P. 4938–4954.

Katoh T., Nakagawa M. Tectogenesis of ultramafic rocks in the Kamuikotan tectonic belt, Hokkaido, Japan // *Monograph Association for Geological Collaboration Japan*. 1986. Vol. 31. P. 119–135 (in Japanese with English abstract).

Kayzar T.M., Nelson B.K., Bachmann O., Bauer A.M., Izbekov P.E. Deciphering petrogenic processes using Pb isotope ratios from time-series samples at Bezmyanny and Klyuchevskoy volcanoes, Central Kamchatka Depression // *Contribut. Mineral. Petrol.* 2014. Vol. 168, Is. 4. P. 1067.

Kelemen P.B., Hanghoj K., Green A.R. One view of the geochemistry of subducting. Elated magmatic arc., with an emphasis on primitive andesites and lower crust // *Treatise on geochemistry* / Eds. H.H. Holland, K.K. Turekian. Elsevier, 2004. P. 593–659.

Keller G.V., Rapolla A. *Physical volcanology*. Amsterdam; New York, 1974. 133 p.

Kepezhinskas P., McDermott F., Defant M.J., Hochstaedter A., Drummond M.S., Hawkesworth C.J., Koloskov A., Maury R.C., Bellon H. Trace element and Sr-Nd-Pb isotopic constraints on a three-component model of Kamchatka Arc petrogenesis // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1997. Vol. 61, Is. 3. P. 577–600.

Kereszturi G., Németh K. Monogenetic basaltic volcanoes: genetic classification, growth, geomorphology and degradation // *Updates in volcanology—new advances in understanding volcanic systems* / K. Németh. (ed.). InTech Open, Rijeka, Croatia, 2012. P. 3–89.

Kersting A.B. Pb isotope ratios of North Pacific sediments, sites 881, 883, and 884; implications for sediment recycling in the Kamchatkan arc // *Proc. of the Ocean Drilling Program. Scientific results*. 1995. Vol. 145. P. 383–388.

Kersting A.B., Arculus R.J. Klyuchevskoy Volcano, Kamchatka, Russia: The Role of High-Flux Recharged, Tapped, and Fractionated Magma Chamber(s) in the Genesis of High-Al₂O₃ from High-MgO Basalt // *J. Petrol.* 1994. Vol. 35, Is. 1. P. 1–41.

Kersting A.B., Arculus R.J. Pb isotope composition of Klyuchevskoy volcano, Kamchatka and North Pacific sediments: Implications for magma genesis and crustal recycling in the Kamchatkan arc // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1995. Vol. 136, Is. 3. P. 133–148.

Kessel R., Schmidt M.W., Ulmer P., Pettke T. Trace element signature of subduction-zone fluids, melts and supercritical liquids at 120–180 km depth // *Nature*. 2005. Vol. 437, Is. 7059. P. 724–727.

Kimura G., Hashimoto Y., Kitamura Yu., Yamaguchi A., Kade H. Middle Miocene swift migration of the TTG triple junction and rapid crustal growth of SW Japan // *AGU Tectonics*. 2014. Vol. 33, doi 10. 1002/2014 TC 003531.

Kimura J.I., Stern R.J., Yoshida T. Re-initiation of subduction and magmatic responses in SW Japan during Neogene time // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 2005. Vol. 117, N 7-8. P. 969–986.

Kirby S.H., Stein S., Okal E.A. and Rubie D.C. Metastable mantle phase transformations and deep earthquakes in subducting oceanic lithosphere // *Rev. Geophys.* 1996. Vol. 34, N 2. P. 261–306.

Kita N., Okada T., Nakajima J., Mitsuzawa T., Hasegawa A. Existence of a seismic bell in the upper plane of the double seismic zone extending in the along-arc direction at depth of 70–100 km beneath NE Japan // *Geophys. Res. Lett.* 2006. Vol. 33, N 1. P. 24310, doi 10. 1029/2006 GL 028239.

Kogiso T., Omori S., Maruyama S. Magma genesis beneath Northeast Japan arc: a new perspective on subduction zone magmatism // *Gond. Res.* 2009. Vol. 16. P. 446–457.

Konstantinovskaya E.A. Geodynamics of an Early Eocene arc–continent collision reconstructed from the Kamchatka Orogenic Belt, NE Russia // *Tectonophysics*. 2000. Vol. 325, Is. 1-2. P. 87–105.

Konstantinovskaia E.A. Arc-continent collision and subduction reversal in the Cenozoic evolution of the Northwest Pacific: an example from Kamchatka (NE Russia) // *Tectonophysics*. 2001. Vol. 333, Is. 1-2. P. 75–94.

Koulakov I. LOTOS code for local earthquake tomographic inversion: Benchmarks for testing tomographic algorithms // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2009. Vol. 99, N 1. P. 194–214, doi: 10.1785/0120080013.

Koulakov I., Abkadyrov I., Arifi N., Deev E., Droznina S., Gordeev E., Jakovlev A., Khrepy S., Kulakov R., Kugaenko Yu., Novgorodova A., Senyukov S., Shapiro N., Stupina T., West M. Three different types of plumbing systems beneath the neighboring active volcanoes of Tolbachik, Bezymianny and Klyuchevskoy in Kamchatka // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2017. <http://dx.doi.org/10.1029/2017JB014082>

Koulakov I., Kukarina E., Fathi I.H., El Khrepy S., Al-Arifi N. Anisotropic tomography of Hokkaido reveals delamination-induced flow above a subducting slab // *J. Geophys. Res.* 2015b. Vol. 120, Is. 5, P. 3219–3239, doi: 10.1002/2014JB011823

Koulakov I., Bohm M., Asch G., Lühr B.-G., Manzanares A., Brotopuspito K.S., Fauzi Pak, Purbawinata M.A., Puspito N.T., Ratdomopurbo A., Kopp H., Rabbel W., Shevkunova E. P and S velocity structure of the crust and the upper mantle beneath central Java from local tomography inversion // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112, B08310, doi:10.1029/2006JB004712.

Koulakov I., Jakovlev A., Luehr B.G. Anisotropic structure beneath central Java from local earthquake tomography // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2009. Vol. 10, Q02011, doi:10.1029/2008GC002109.

Koulakov I., Jakovlev A., Wu Y.-M., Dobretsov N.L., El Khrepy S., Al-Arifi N. Three-dimensional seismic anisotropy in the crust and uppermost mantle beneath the Taiwan area revealed by passive source tomography // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2015a. Vol. 120, N 11. P. 7814–7829, doi:10.1002/2015JB012408.

Koulakov I., Gordeev E.I., Dobretsov N.L., Vernikovskiy V.A., Senyukov S., Jakovlev A. Feeding volcanoes of the Kluchevskoy group from the results of local earthquake tomography // *Geophys. Res. Lett.* 2011. Vol. 38. L09305. doi:10.1029/2011GL046957.

Koulakov I., Gordeev E.I., Dobretsov N.L., Vernikovskiy V.A., Senyukov S., Jakovlev A., Jaxybulatov K. Rapid changes in magma storage beneath the Klyuchevskoy group of volcanoes inferred from time-dependent seismic tomography // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2013. Vol. 263. P. 75–91, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.10.014.

Koulakov I., Sobolev S.V., Asch G. P- and S-velocity images of the lithosphere-aesthenosphere system in the Central Andes from local-source tomographic inversion // *Geophys. Journ. Int.* 2006. Vol. 167. P. 106–126.

Kudo A.M., Weill D.F. An igneous plagioclase thermometer // *Contribut. Mineral. Petrol.* 1970. Vol. 25, Is. 1. P. 52–65.

Kugaenko Yu., Titkov N., Saltykov V. Constraints on unrest in the Tolbachik volcanic zone in Kamchatka prior the 2012-13 flank fissure eruption of Plosky Tolbachik volcano from local seismicity and GPS data // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2015. Vol. 307. P. 38–46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.05.020>

Kuznetsov P.Y., Koulakov I.Yu. The three-dimensional structure beneath the Popocatepetl volcano (Mexico) based on local earthquake seismic tomography // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2014. V. 276. P. 10–21. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2014.02.01

Lamoreaux R.H., Hildenbrand D.L. High temperature vaporization behavior of oxides. I. Alkali metal binary oxides // *J. Phys. Chem. Ref. Data*. 1984. Vol. 13. P. 151–173.

Lander A.V., Shapiro M.N. The Origin of the Modern Kamchatka Subduction Zone // *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region* / Eds. J. Eichelberger et al. Washington, DC: American Geophysical Union, 2007. P. 57–64.

Lange R.A., Carmichael I.S.E. Densities of Na₂O-K₂O-CaO-MgO-FeO-Fe₂O₃-Al₂O₃-TiO₂-SiO₂ liquids: new measurements and derived partial molar properties // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1987. Vol. 51, N 11. P. 2931–2946.

Le Maitre R.W. (Ed.) *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks.* Cambridge University Press, 2002. 236 p.

Le Maitre R.W. A classification of igneous rocks and glossary of terms. Recommendations of the IUGS commission on the systematics of igneous rocks. Oxford: Blackwell Science Inc, 1989. 206 c.

Lees J.M., Symons N., Chubarova O., Gorelchik V., Ozerov A. Tomographic Images of Kliuchevskoi Volcano P-wave Velocity // *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region* / ed. J. Eichelberger, E. Gordeev, M. Kasahara, P. Izbekov. 2007.

Lee C.-T. A., Lee T.-C., Wu C.-T. Modeling the compositional evolution of recharging, evacuating, and fractionating (REFC) magma chambers: implications for differentiation of arc magmas // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2014. Vol. 143. P. 8–22. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2013.08.009>.

Lepel E.A., Stefansson K.M., Zoller W.H. The enrichment of volatile elements in the atmosphere by volcanic activity: Augustine Volcano 1976 // *J. Geophys. Res.* 1978. Vol. 83. P. 6213–6220.

Levin V., Droznina S., Gavrilenko M., Carr M. J., Senyukov S. Seismically active subcrustal magma source of the Klyuchevskoy volcano in Kamchatka, Russia // *Geology*. 2014. Vol. 42, N 11. P. 983–986.

Levin V., Shapiro N., Park J., Ritzwoller M. Seismic evidence for catastrophic slab loss beneath Kamchatka // *Nature*. 2002. Vol. 418. P. 763–767.

Lloyd A.S. et al. Volatile loss from melt inclusions in pyroclasts of differing sizes // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2013. Vol. 165, N 1. P. 129–153.

Loucks R.R. A precise olivine-augite Mg-Fe-exchange geothermometer // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1996. Vol. 125, N 2. P. 140–150.

Luehr B.G., Koulakov I., Rabbel W., Zschau J., Ratdomopurbo A., Brotopuspito K.S., Fauzi P., Sahara D.P. Fluid ascent and magma storage beneath Gunung Merapi revealed by multi-scale seismic imaging // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2013. Vol. 261. P. 7–19.

Lundgren P., Kiryukhin A., Milillo P., Samsonov S. Dike model for the 2012–2013 Tolbachik eruption constrained by satellite radar interferometry observations // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2015. Vol. 307. P. 79–88.

Magee C., Muirhead J.D., Karvelas A. et al. Lateral magma flow in mafic sill complexes // *Geosphere*. 2016. Vol. 12, N 3. P. 809–841. doi:10.1130/GES01256.1.

Manghnani M.H., Rai C.S. Electrical conductivity of ultramafic rocks to 1550 °C: relevance to the effects of partial melting // *Intern. Geodynam. Conf. Western Pacific and Magma genesis*. Tokyo, 1978. P. 290–291.

Marsh B.D. On the crystallinity, probability of occurrence, and rheology of lava and magma // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1981. Vol. 78, N 1. P. 85–98.

Marsh B.D., Carmichael I.S. Benioff zone magmatism // *J. Geophys. Res.* 1974. Vol. 79, N 8. P. 1196–1206.

Martin R.S., Sawyer G.M., Day J.A., Le Blond J.S., Ilyinskaya E., Oppenheimer C. High-resolution size distributions and emission fluxes of trace elements from Masaya volcano, Nicaragua // *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117. P. 1–12. doi:10.1029/2012JB009487

Martin H., Smithies R.H., Rapp P.R., Moyen J.F., Champion D. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution // *Lithos*. 2005. Vol. 79, Iss. 1-2. P. 1–24.

Matsumoto A. Improvement for determination of potassium in K-Ar dating // *Bull. Geolog. Surv. Jap.* 1989. Vol. 40, N 2. P. 65–70. (Japanese).

McCulloch M.T., Perfit M.R. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and trace element constraints on the petrogenesis of Aleutian island arc magmas // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1981. Vol. 56. P. 167–179.

Melnikov D., Volynets A. Remote sensing and petrological observations on the 2012–2013 fissure eruption at Tolbachik volcano, Kamchatka: implications to the reconstruction of the eruption chronology // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2015. Vol. 307. P. 89–97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.09.025>

Meyer B., Saltus R., Chulliat A. EMAG2: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution) Version 3. National Centers for Environmental Information, NOAA. Model. 2016: doi:10.7289/V5H70CVX

- Minster J.B., Jordan T.H.** Present-day plate motions // *J. Geophys. Res.* 1978. Vol. 83, N B11. P. 5331–5354.
- Miyashiro A.** Volcanic rock series in island arcs and active continental margins // *Am. J. Sci.* 1974. Vol. 274, Is. 4. P. 321–355.
- Miyazaki T., Vaglarov B.S., Takei M., Suzuki M., Suzuki H., Ohsawa K., Chang Q., Takahashi T., Hirahara Y., Hanyu T., Kimura J.-I., Tatsumi Y.** Development of a fully automated open-column chemical-separation system -COLUMNSPIDER- and its application to Sr-Nd-Pb isotope analyses of igneous rock samples // *J. Mineral. Petrol. Sci.* 2012. Vol. 107, Is. 2. P. 74–86.
- Moh G.** Tin-Containing Mineral Systems/ Part II: Phase Relations and mineral assemblages in Cu-Fe-Zn-Sn-S system // *Chemie Der Erde-Geochemistry.* 1975. Vol. 34, N 1. P. 1–61.
- Moune S., Gauthier P.-J., Delmel P.** Trace elements in the particulate phase of the plume of Masaya Volcano, Nicaragua // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2010. Vol. 193. P. 232–244.
- Münker C., Wörner G., Yogodzinski G., Churikova T.** Behaviour of high field strength elements in subduction zones: constraints from Kamchatka–Aleutian arc lavas // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2004. Vol. 224, Is. 3–4. P. 275–293.
- Murase T., McBirney A.R.** Properties of some common igneous rocks and their melts at high temperatures // *Bull. Geol. Soc. Amer.* 1973. Vol. 84, N 11. P. 3563–3592.
- Nakajima J., Tanohi T., Ohyashiki K.** Three-dimensional structure of V_p , V_s and V_p/V_s beneath N-E Japan: implications for arc magmatism and fluids // *LeuKemia.* 2001. Vol. 15. P. 989–991.
- Nakajima J., Tsuji T., Hasegawa A., Kita S., Okada T., Matsuzawa T.** Tomographic imaging of hydrated crust and mantle in the subducting Pacific slab beneath Hokkaido, Japan: evidence for dehydration embrittlement as a cause of inslab earthquakes // *Gondwana Res.* 2009. Vol. 16. P. 470–481.
- Nakajima J., Takei Y., Hasegawa A.** Quantitative analysis of the inclined low-velocity zone in the mantle wedge of northeastern Japan: A systematic change of melt-filled pore shapes with depth and its implications for melt migration // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2005. Vol. 234, N 1. P. 59–70.
- Nemeth K.** Monogenetic volcanic fields: origin, sedimentary record, and relationship with polygenetic volcanism // *What is a Volcano?* (eds.) E. Canon-Tapia, A. Szakacs // *Geol. Soc. Am. Spec. Paper.* 2010. Vol. 470. P. 43–66.
- Nemeth K., Kereszturi G.** Monogenetic volcanism: personal views and discussion // *Int. J. Earth Sci.* 2015. Vol. 104. P. 2131–2146.
- Newman S., Lowenstern J.B.** Volatile Calc: a silicate melt-H₂O-CO₂ solution model written in Visual Basic for Excel // *Comput. Geosci.* 2002. Vol. 28, N 5. P. 597–604.
- Nikogosian I.K., Manfred J., van Bergen M.J.** Heterogeneous mantle source of potassium-rich magmas in Central-Southern Italy: Melt inclusion evidence from Roccamonfina and Ernici (Mid Latina Valley) // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2010. Vol. 197, N 1. P. 279–302.
- Nikolaeva K., Gerya T.V., Margues F.O.** Subduction initiation at passive margins: Numerical modeling // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. B03406.
- Nishizawa T., Nakamura H., Churikova T., Gordeychik B., Ishizuka O., Iwamori H.** Petrological and chronological study of primitive high-Mg andesite from monogenetic volcanoes in the forearc region of northern Kamchatka Peninsula // 8nd International Seismic-Volcanic Workshop on North-Japanese, Kurile-Kamchatkan, and Aleutian- Alaskan Subduction Processes. Hokkaido, Japan 2014.
- O'Hara M.J., Mathews R.E.** Geochemical evolution in an advancing, periodically replenished, periodically tapped, continuously fractionated magma chamber // *J. Geol. Soc.* 1981. Vol. 138, N 5. P. 237–277.
- Orheim Olav.** A 200-year record of glacier mass balance at Deception Island, southwest Atlantic Ocean, and its bearing on models of global climatic change // *Rept. Inst. Polar Studier.* 1972. Vol. 42. 118 p.

Ozerov A.Y. The evolution of high-alumina basalts of the Klyuchevskoy volcano, Kamchatka, Russia, based on microprobe analyses of mineral inclusions // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2000. Vol. 95, Is. 1-4. P. 65–79.

Paige C.C., Saunders M.A. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares // *ACM Trans. Math. Softw.* 1982. Vol. 8. P. 43–71.

Park J., Levin V., Brandon M., Lees J., Peyton V., Gordeev E., Ozerov A. A Dangling Slab, Amplified Arc Volcanism, Mantle Flow and Seismic Anisotropy in the Kamchatka Plate Corner // *Plate Boundary Zones American Geophysical Union*, 2002. P. 295–324.

Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) // *J. Geoph. Res.* 2012. Vol. 117, B04406, doi:10.1029/2011JB008916, 2012

Pearce J.A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins // *Continental Basalts and Mantle Xenoliths* / Eds. C.J. Hawkesworth, M.J. Norry. Nantwich: Shiva Publishing, 1983. P. 230–249.

Pearce J.A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries // *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks* / Ed. Thorpe R.S. New York: Wiley, 1982. C. 525–548.

Petreronotis K.E., Jurdy D.M. Pacific plate reconstructions and uncertainties // *Tectonophysics*. 1990. Vol. 182. N 3-4. P. 383–391.

Phillipson G., Sobradelo R., Gottsmann J. Global volcanic unrest in the 21st century: An analysis of the first decade // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2013. Vol. 264. P. 183–196.

Pineau F., Semet M.P., Grassineau N., Okrugin V.M., Javoy M. The genesis of the stable isotope (O, H) record in arc magmas: the Kamchatka's case // *Chem. Geol.* 1999. Vol. 153, Is. 1–4. P. 93–124.

Plank T., Cooper L.B., Manning C.E. Emerging geothermometers for estimating slab surface temperatures // *Nature Geosci.* 2009. Vol. 2, Is. 9. P. 611–615.

Plank T., Kelley K.A., Zimmer M.M., Hauri E.H., Wallace P.J. Why do mafic arc magmas contain ~4 wt% water on average ?// *Earth Planet. Sci. Lett.* 2013. Vol. 364. P. 168–179.

Plechov P., Blundy J., Nekrylov N., Melekhova E., Shcherbakov V., Tikhonova M.S. Petrology and volatile content of magmas erupted from Tolbachik Volcano, Kamchatka, 2012–13 // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2015. Vol. 307. P. 182–199. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.08.011>

Poli S., Schmidt M.W. H₂O transport and release in subduction zones: Experimental constraints on basaltic and andesitic systems // *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 100. P. 22299–22314.

Ponomareva V.V., Melekestsev I.V., Dirksen O.V. Sector collapses and large landslides on Late Pleistocene–Holocene volcanoes in Kamchatka, Russia // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2006. Vol. 158, Is. 1–2. P. 117–138.

Ponomareva V., Kyle P., Pevzner M., Sulerzhitsky L., Hartman M. Holocene Eruptive History of Shiveluch Volcano, Kamchatka Peninsula, Russia // *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region*. Washington: American Geophysical Union, 2007. P. 263–282.

Ponomareva V., Portnyagin M., Derkachev A., Pendea I. F., Bourgeois J., Reimer P. J., Garbe-Schönberg D., Krasheninnikov S., Nürnberg D. Early Holocene M~6 explosive eruption from Plosky volcanic massif (Kamchatka) and its tephra as a link between terrestrial and marine paleoenvironmental records // *Int. J. Earth Sci.* 2013. Vol. 102, Is. 6. P. 1673–1699.

Ponomareva V., Portnyagin M., Pevzner M., Blaauw M., Kyle P., Derkachev A. Tephra from andesitic Shiveluch volcano, Kamchatka, NW Pacific: chronology of explosive eruptions and geochemical fingerprinting of volcanic glass // *Int. J. Earth Sci.* 2015. Vol. 104, Is. 5. P. 1459–1482.

Portnyagin M., Bindeman I., Hoernle K., Hauff F. Geochemistry of Primitive Lavas of the Central Kamchatka Depression: Magma Generation at the Edge of the

- Pacific Plate // *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region* / Eds. J. Eichelberger et al. American Geophysical Union, 2007a. P. 199–239.
- Portnyagin M., Hoernle K., Avdeiko G., Hauff F., Werner R., Bindeman I., Uspensky V., Garbe-Schönberg D.** Transition from arc to oceanic magmatism at the Kamchatka-Aleutian junction // *Geology*. 2005. Vol. 33, Is. 1. P. 25–28.
- Portnyagin M., Hoernle K., Plechov P., Mironov N., Khubunaya S.** Constraints on mantle melting and composition and nature of slab components in volcanic arcs from volatiles (H₂O, S, Cl, F) and trace elements in melt inclusions from the Kamchatka Arc // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2007. Vol. 255, Is. 1-2. P. 53–69.
- Portnyagin M., Manea V.C.** Mantle temperature control on composition of arc magmas along the Central Kamchatka Depression // *Geology*. 2008. Vol. 36, Is. 7. P. 519–522.
- Portnyagin M., Duggen S., Hauff F., Mironov N., Bindeman I., Thirlwall M., Hoernle K.** Geochemistry of the Late Holocene rocks from the Tolbachik volcanic field, Kamchatka: towards quantitative modeling of subduction-related open magmatic systems // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2015. Vol. 307. P. 133–155. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.08.015>
- Powell M.** Crystallisation conditions of low-pressure cumulate nodules from the Lesser Antilles island arc // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1978. Vol. 39, Is. 1. P. 162–172.
- Rai C.S., Manghanani M.H.** Electrical conductivity of ultramafic rock to 1820 Kelvin // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1978. Vol. 17. P. 6–13.
- Reiche P.** The toreva-block – a distinctive landslide type // *The J. Geol.* 1937. Vol. 45. P. 538–548.
- Ripepe M., Gordeev E.** Gas bubble dynamics model for shallow volcanic tremor at Stromboli // *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104. P. 10639–10654.
- Rodi W., Mackie R.L.** Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magneto-telluric inversion // *Geophysics*. 2001. Vol. 66. P. 174–187.
- Ruh J.B., Sallarès V., Ranero C.R., Gerya T.** Crustal deformation dynamics and stress evolution during seamount subduction: High-resolution 3-D numerical modeling // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. 2016. Vol. 121, doi:10.1002/2016JB013250.
- Ruprecht P., Woerner G.** Variable regimes in magma systems documented in plagioclase zoning patterns: El Misti stratovolcano and Andahua monogenetic cones // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2007. Vol. 165. P. 142–162.
- Ruscitto D.M., Wallace P.J., Cooper L.B., Plank T.** Global variations in H₂O/Ce: 2. Relationships to arc magma geochemistry and volatile fluxes // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2012. Vol. 13, Is. 3. P. 1–27.
- Sano Y., Fisher T.** The Analysis and Interpretation of Noble Gases in Modern Hydrothermal Systems // *The Noble Gases as Geochemical Tracers* / ed. P. Burnard. Springer-Verlag, 2013. P. 347–419.
- Saunders A.D., Norry M.J., Tarney J.** Origin of MORB and Chemically-Depleted Mantle Reservoirs: Trace Element Constraints // *J. Petrol.* 1988. Special Vol. Is. 1. P. 415–445.
- Saxena S.K.** Two-pyroxene geothermometer: a model with an approximate solution // *Am. Mineral.* 1976. Vol. 61, Is. 7-8. P. 643–652.
- Scholl D.W.** Viewing the Tectonic Evolution of The Kamchatka-Aleutian (KAT) Connection with an Alaska Crustal Extrusion Perspective // *Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region* / Eds. J. Eichelberger et al. Washington, DC: American Geophysical Union, 2007. P. 3–35.
- Senyukov S.L., Droznina S.Ya., Kozhevnikova T.Yu.** Experience of the detection of ash plume and estimation its height using local seismicity for Kamchatkan volcanoes during 2003–2011 (Kamchatka Peninsula, Russia) // *Complex monitoring of volcanic activity: methods and results*, New York: Nova Science Publishers, Inc., 2013. P. 35–52.
- Senyukov S.L., Nuzdina I.N., Droznina S.Ya., Garbuzova V.T., Kozhevnikova T.Yu., Sobolevskaya O.V., Nazarova Z.A., Bliznetsov V.E.** Seismic monitoring of the Plosky Tolbachik eruption in 2012–13 (Kamchatka Peninsula, Russia) // *J.*

- Volcanol. Geotherm. Res. 2015. Vol. 307. P. 47–59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.07.026>
- Shankland T.I., Waff H.S.** Conductivity in fluid-bearing rocks // *J. Geophys. Res.* 1974. Vol. 79, N 32. P. 5409–5417.
- Shantser A.Y.** Basement xenoliths in the eruption products of the new Tolbachik volcanoes and the problem of formation of magma conduits in the upper crust // *The Great Tolbachik Fissure Eruption: Geological and Geophysical Data 1975–1976* / Eds. S.A. Fedotov, Y.K. Markhinin. Cambridge: Cambridge University Press, 1983. P. 72–82.
- Shapiro N.M., Campillo M., Stehly L., Ritzwoller M.H.** High-Resolution Surface-Wave Tomography from Ambient Seismic Noise // *Science*. 2005. Vol. 307, Is. 5715. P. 1615–1618.
- Shcherbakov V.D., Plechov P.Y., Izbekov P.E., Shipman J.S.** Plagioclase zoning as an indicator of magma processes at Bezymianny Volcano, Kamchatka // *Contribut. Mineral. Petrol.* 2011. Vol. 162. P. 83–99.
- Shepherd E.S.** Kilauea gases, 1919 // *Hawaiian Volcano Obs. Bull.* 1921. Vol. 9. P. 83–88.
- Shinohara H.** Volatile flux from subduction zone volcanoes: Insights from a detailed evaluation of the fluxes from volcanoes in Japan // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2013. Vol. 268. P. 46–63. doi:10.1016/j.jvolgeores.2013.10.007
- Sibley D.F., Vogel T.A., Walker B.M., Byerly G.** The origin of oscillatory zoning in plagioclase: a diffusion and growth controlled model // *Am. J. Sci.* 1976. Vol. 276. P. 275–284.
- Sigmarrsson O., Karlsson H.R., Larsen G.** The 1996 and 1998 subglacial eruptions beneath the Vatnajökull ice sheet in Iceland: contrasting geochemical and geophysical inferences on magma migration // *Bull. Volcanol.* 2000. Vol. 61. P. 468–476.
- Sigmundsson F., Hooper A., Hreinsdottir S. et al.** Segmented lateral dyke growth in a rifting event at Bargarbunga volcanic system, Iceland // *Nature*. 2015. Vol. 517. 08 January 2015. P. 191–195. doi:10.1038/nature14111.
- Sigvaldason G.E., Annertz K., Nilsson M.** Effect of glacier loading/deloading on volcanism: postglacial volcanic production rate of the Dyngjufjöll area, central Iceland // *Bull. Volcanol.* 1992. Vol. 54, Is. 5. P. 385–392.
- Simakin A., Shaposhnikova O.** Early Holocene volcanism in CKD (Kamchatka) as a mechanical probe of the stress level in the crust // *Geophys. Res. Abstracts*. 2016. Vol. 18. P. EGU2016–9164.
- Simakin A., Salova T., Devyatova V., Zelensky M.** Reduced carbonic fluid and possible nature of high-K magmas of Tolbachik // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2015. Vol. 307. P. 210–221
- Simkin T., Siebert L.** *Volcanoes of the World*, 2nd edition. Geoscience Press in association with the Smithsonian Institution Global Volcanism Program, Tucson AZ, 1994. 368 p.
- Simonov V.A., Peyve A.A., Kolobov V.Yu., Milosnov A.A., Kovyazin S.V.** Magmatic and hydrothermal processes in the Bouvet Triple Junction Region (South Atlantic) // *Terra Nova*. 1996. Vol. 8. P. 415–424.
- Smith I.E.M., Nemeth K.** Source to surface model of monogenetic volcanism: a critical review // *Monogenetic volcanism* / eds. K. Nemeth, G. Carrasco-Nunez, J.J. Aranda-Gomez, I.E.M. Smith. Geological Society, London, Special Publications, 2017. Vol. 446. <https://doi.org/10.1144/SP446.14>
- Sobolev A.V., Chaussidon M.** H₂O concentrations in primary melts from suprasubduction zones and mid-oceanic ridges: implications for H₂O storage and recycling in the mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1996. Vol. 137, N 1. P. 45–55.
- Solomina O.N., Muravyev Ya.D., Bazanova L.I.** Little Ice Age glaciers in Kamchatka, northeastern Russia // *Ann. Glaciol.* 1995. N 21. P. 240–244.
- Soloviev A.V., Shapiro M.N., Garver J.L., Shcherbinina E.A., Kravchenko-Berezhnoy I.R.** New age data from the Lesnaya Group: A key to understanding the timing of arc-continent collision, Kamchatka, Russia // *Island. Arc.* 2002. Vol. 11, N 1. P. 79–90.

Sun S.-s., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Geol. Soc., London. Spec. Publ.* 1989. Vol. 42, Is. 1. P. 313–345.

Swift C.M. A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States. Ph. D. Dissertation, MIT, Cambridge, 1967. 248 p.

Symonds R.B., Reed M.H. Calculation of multicomponent chemical equilibria in gas-solid-liquid systems: calculation methods, thermochemical data, and applications to studies of high-temperature volcanic gases with examples from Mount St. Helens // *Am. J. Sci.* 1993. Vol. 293. P. 758–864.

Symonds R.B., Rose W.I., Reed M.H., Lichte F., Finnegan D.L. Volatilization, transport and sublimation of metallic and non-metallic elements in high temperature gases at Merapi Volcano, Indonesia. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 51, P. 2083–2101. doi:10.1016/0016-7037(87)90258-4

Syracuse E.M., Albers G.A. Global compilation of variations in slab depth beneath arc volcanoes and implications // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2006. Vol. 23. doi:10.1029/2005GC001045.

Taisne B., Brenguier F., Shapiro N.M., Ferrazzini V. Imaging the dynamics of magma propagation using radiated seismic intensity // *Geophys. Res. Lett.* 2011. Vol. 38, Is. 4. P. 1–5.

Takahashi T., Hirahara Y., Miyazaki T., Vaglarov B.S., Chang Q., Kimura J.-I., Tatsumi Y. Precise determination of Sr isotope ratios in igneous rock samples and application to micro-analysis of plagioclase phenocrysts // *JAMSTEK Report of Research and Development.* 2009. Special Issue. P. 59–64.

Taran Y.A., Zelenski M.E. Systematics of water isotopic composition and chlorine content in arc-volcanic gases. In: Zellmer G.F., Edmonds M. & Straub S.M. (eds) *The Role of Volatiles in the Genesis, Evolution and Eruption of Arc Magmas.* Geological Society, London, Special Publications, 2014. 410 p. <http://dx.doi.org/10.1144/SP410.5>

Taran Y.A., Bernard A., Gavilanes J.-C., Lunezheva E., Cortes A., Armiента M.A. Chemistry and mineralogy of high-temperature gas discharges from Colima volcano, Mexico. Implications for magmatic gas-atmosphere interaction // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2001. Vol. 108. P. 245–264. doi:10.1016/S0377-0273(00)00289-4

Taran Y.A., Hedenquist J.W., Korzhinskii M., Tkachenko S.I., Shmulovich K.I. Geochemistry of magmatic gases from Kudryavy volcano, Iturup, Kuril Islands // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1995. Vol. 59. P. 1749–1761.

Tatsumi Y. Migration of fluid and genesis of basalt magmas in subduction zones // *J. Geophys. Res.* 1989. Vol. 94. P. 4697.

Tatsumi Y., Kogiso T., Nohda S. Formation of a third volcanic chain in Kamchatka: generation of unusual subduction-related magmas // *Contribut. Mineral. Petrol.* 1995. Vol. 120, Is. 2. P. 117–128.

Taylor H.P. The effects of assimilation of country rocks by magmas on $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ systematics in igneous rocks // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1980. Vol. 47, Is. 2. P. 243–254.

Tazieff H., Guern F., Carbonelle J., Zetwoog P. Etude chimique des fluctuations des gaz eruptifs de volcan Erta Ale (Afar, Ethiopia) // *C.R. Acad. Sci. Paris. Ser. D.* 1972. Vol. 274. P. 1003–1006.

Telling J., Flower V.J.B., Carn S.A. A multi-sensor satellite assessment of SO_2 emissions from the 2012–13 eruption of Plosky Tolbachik volcano, Kamchatka // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2015. Vol. 307. P. 98–106.

Thelen W., West M., Senyukov S. Seismic characterization of the fall 2007 eruptive sequence at Bezmyanny Volcano, Russia // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2010. Vol. 194, Is. 4. P. 201–213.

Thompson R.N. The 1-atmosphere liquidus oxygen fugacities of some tholeiitic intermediate, alkalic and ultra-alkalic lavas // *Am. J. Sci.* 1975. Vol. 275, Is. 9. P. 1049–1072.

Tibaldi A. Structure of volcano plumbing systems: A review of multi-parametric effects // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2015. Vol. 298. P. 85–135.

Timina T.Yu., Kovyazin S.V., Tomilenko A.A., Kuznetsov G.V. Composition of melt and fluid inclusions in spinel of peridotite xenoliths from Avacha volcano (Kamchatka, Russia) // ACROFI III and TBG XIV Abstracts. Novosibirsk: SB RAS, 2010. P. 238–239.

Turner S.J., Izbekov P., Langmuir C. The magma plumbing system of Bezymianny Volcano: Insights from a 54 year time series of trace element whole-rock geochemistry and amphibole compositions // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2013. Vol. 263. P. 108–121.

Turner S., Evans P., Hawkesworth C. Ultrafast Source-to-Surface Movement of Melt at Island Arcs from ^{226}Ra – ^{230}Th Systematics // Science. 2001. Vol. 292, Is. 5520. P. 1363–1366.

Turner S., McDermott F., Hawkesworth C., Kepezhinskas P. A U-series study of lavas from Kamchatka and the Aleutians: constraints on source composition and melting processes // Contribut. Mineral. Petrol. 1998. Vol. 133, Is. 3. P. 217–234.

Turner S., Sims K.W.W., Reagan M., Cook C. A ^{210}Pb – ^{226}Ra – ^{230}Th – ^{238}U study of Klyuchevskoy and Bezymianny volcanoes, Kamchatka // Geochim. Cosmochim. Acta. 2007. Vol. 71, Is. 19. P. 4771–4785.

Ueda S. Subduction zones: An introduction to comparative subductology // Tectonophysics. 1982. Vol. 81. P. 133–159.

Um J., Thurber C.H. A fast algorithm for two-point seismic ray tracing // Bull. Seism. Soc. Am. 1987. Vol. 77. P. 972–986.

Umeda K., Ban M., Hayashi S., Kusano T. Tectonic shortening and coeval volcanism during the Quaternary, Northeast Japan arc // J. Earth System Sci. 2013. Vol. 122. N 1. P. 137–147.

Unglert K., Radic V., Jellinek A. Principal component analysis vs. self-organizing maps combined with hierarchical clustering for pattern recognition in volcano seismic spectra // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2016. Vol. 320. P. 58–74.

Van Keken P.E., Hacker B.R., Syracuse E.M., Abers G.A. Subduction factory: 4. Depth-dependent flux of H_2O from subducting slabs worldwide // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2011. Vol. 116, Is. B1. P. 1–15.

Volynets A. et al. Petrology and geochemistry of the New Tolbachik Fissure Eruption volcanic rocks and their evolution during the first two weeks of eruption Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Russia. 2013. P. 2013.

Volynets A.O., Churikova T.G., Wörner G., Gordeychik B.N., Layer P. Mafic Late Miocene–Quaternary volcanic rocks in the Kamchatka back arc region: implications for subduction geometry and slab history at the Pacific–Aleutian junction // Contribut. Mineral. Petrol. 2010. Vol. 159, Is. 5. P. 659–687.

Volynets O.N. Geochemical Types, Petrology, and Genesis of Late Cenozoic Volcanic Rocks from the Kurile-Kamchatka Island-Arc System // Int. Geol. Rev. 1994. Vol. 36, Is. 4. P. 373–405.

Volynets A., Edwards B., Melnikov D., Yakushev A., Griboedova I. Monitoring of the volcanic rock compositions during the 2012–2013 fissure eruption at Tolbachik volcano, Kamchatka // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2015. Vol. 307. P. 120–132.

Volynets O.N., Flerov G.B., Andreev V.N. et al. Geochemical features of the rocks of the Great Tolbachik Fissure Eruption 1975–1976 in relation to petrogenesis // The Great Tolbachik Fissure Eruption: Geological and Geophysical Data. Cambridge Earth Science Series. Cambridge University Press, 1983. P. 116–140.

Waff H.S., Weill D.F. Electrical conductivity of magmatic liquids: Effects of temperature, oxygen fugacity, and composition // Earth Planet. Sci. Lett. 1975. Vol. 28, P. 254–260.

Wallace P.J., Kamenetsky V.S., Cervantes P. Melt inclusion CO_2 contents, pressures of olivine crystallization, and the problem of shrinkage bubbles // Am. Mineral. 2015. Vol. 100, N 4. P. 787–794.

Watts A.W., Kogan M.G., Bodine J.H. Gravity field of the Northwest Pacific Ocean basin and its margin: Kurile Island arc-trench system. Wash. (D.C.) // Geol. Soc. Amer. Map and Chart Ser.; MCS-7. 1978.

Wells P.R.A. Pyroxene thermometry in simple and complex systems // *Contribut. Mineral. Petrol.* 1977. Vol. 62, Is. 2. P. 129–139.

West M.E. Recent eruptions at Bezymianny volcano: A seismological comparison // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2013. Vol. 263. P. 42–57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.12.015>.

Wu Y.M., Chang C.H., Zhao L., Shyu J.B.H., Chen Y.G., Sieh K. and Avo-uac J.P. Seismic tomography of Taiwan: Improved constraints from a dense network of strong motion stations // *J. Geophys. Res.: Solid Earth.* 2007. Vol. 112, N (B8).

Yogodzinski G.M., Lees J.M., Churikova T.G., Dorendorf F., Woerner G., and Volynets O.N. Geochemical evidence for the melting of subducting oceanic lithosphere at plate edges // *Nature.* 2001. Vol. 409. P. 500–504.

Yudovskaja M.A., Distler V.V., Chaplygin I.V., Mokhov A.V., Trubkin N.V., Garbacheva S.A. Gaseous transport and deposition of gold in magmatic fluid: volcano Kurilo Islands // *Miner. Deposita.* 2006. Vol. 40. P. 828–848.

Zelenski M., Malik N., Taran Yu. Emissions of trace elements during the 2012–2013 effusive eruption of Tolbachik volcano, Kamchatka: enrichment factors, partition coefficients and aerosol contribution // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2014. Vol. 285. P. 136–149.

Zelenski M., Fischer T.P., de Moor J.M., Marty B., Zimmermann L., Ayalew D., Nekrasov A.N., Karandashev V.K. Trace elements in the gas emissions from the Erta Ale volcano, Afar, Ethiopia // *Chem. Geol.* 2013. Vol. 357. P. 95–116. doi:10.1016/j.chemgeo.2013.08.022

Zeumann S., Hampel A. Three-dimensional finite-element models on the deformation of forearcs caused by aseismic ridge subduction: The role of ridge shape, friction coefficient of the plate interface and mechanical properties of the forearc // *Tectonophysics.* 2016. Vol. 684. P. 76–92, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2015.12.022>

Zhao D. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: insight into deep Earth dynamics // *Phys. Earth and Planet. Interiors.* 2004. Vol. 146, N 1. P. 3–34.

Zhao D., Maruyama S., Omori S. Mantle dynamics of Western Pacific and East Asia: insight from seismic tomography and mineral physics // *Gondwana Res.* 2007. Vol. 11, N 1. P. 120–131.

Zhao D., Yamamoto Y., Yanada T. Global mantle heterogeneity and its influence on teleseismic regional tomography // *Gondwana Res.* 2013. Vol. 23, N 2. P. 595–616

Zoller W.H., Parrington J., Phelan Kotra J. Iridium enrichment in airborne particles from Kilauea volcano: January 1983 // *Science.* 1983. Vol. 222. P. 4–7.

СПИСОК АВТОРОВ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

академик Гордеев Евгений Ильич (ИВиС ДВО РАН)
академик Добрецов Николай Леонтьевич (ИНГГ СО РАН)
чл.-корр. РАН Кулаков Иван Юрьевич (ИНГГ СО РАН)
канд. геогр. наук Муравьев Ярослав Дмитриевич (ИВиС ДВО РАН)
канд. геол.-мин. наук Волынец Анна Олеговна (ИВиС ДВО РАН)

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Кукарина Екатерина Васильевна (ИНГГ СО РАН)

АВТОРЫ РАЗДЕЛОВ

Абкадыров Ильяс Фаритович (ИВиС ДВО РАН)
Абубакиров Искандер Радиевич (ИВиС ДВО РАН)
Аникин Леонид Павлович (ИВиС ДВО РАН)
Василевский Александр Николаевич (ИНГГ СО РАН)
Воропаев Петр Валентинович (КФ ФИЦ ЕГС)
Гарбузова Валентина Тимофеевна (КФ ФИЦ ЕГС)
Горбатилов Андрей Вениаминович (ИФЗ РАН)
Гордейчик Борис Николаевич (ИЭМ РАН)
Горностаева Татьяна Александровна (ИГЕМ РАН)
Грибоедова Ирина Геннадьевна (ИГЕМ РАН)
Двигало Виктор Николаевич (ИВиС ДВО РАН)
Демянчук Юрий Владимирович (ИВиС ДВО РАН)
Дрознин Дмитрий Валерьевич (КФ ФИЦ ЕГС)
Дрознина Светлана Ярославовна (КФ ФИЦ ЕГС)
Зеленин Егор Александрович (ГИН РАН)
Зеленский Михаил Евгеньевич (ИЭМ РАН)
Ивамори Хикару (Iwamori Hikaгу) Японское агентство морских
и земных наук и технологий
Иванова Елена Ивановна (КФ ФИЦ ЕГС)
Карпов Геннадий Александрович (ИВиС ДВО РАН)
Кожевникова Татьяна Юрьевна (КФ ФИЦ ЕГС)
Котляров Алексей Васильевич (ИГМ СО РАН)
Кугаенко Юлия Александровна (КФ ФИЦ ЕГС)
Логинов Владислав Александрович (ИВиС ДВО РАН)

Магуськин Кирилл Мефодьевич (ИВиС ДВО РАН)
Магуськин Мефодий Антонович (ИВиС ДВО РАН)
Малик Наталия Александровна (ИВиС ДВО РАН)
Мельников Дмитрий Владимирович (ИВиС ДВО РАН)
Мороз Юрий Федорович (ИВиС ДВО РАН)
Мохов Андрей Владимирович ИГЕМ РАН
Назарова Зоя Анатольевна (КФ ФИЦ ЕГС)
Накамура Хитоми (Nakamura Hitomi) Японское агентство морских
и земных наук и технологий
Некрылов Николай Андреевич (МГУ, Минералогический музей
имени А.Е. Ферсмана)
Нишизава Тацужи (Nishizawa Tatsuji) Токийский технологический институт
Новгородова Анжелика Михайловна (ИНГГ СО РАН)
Нуждина Ирина Николаевна (КФ ФИЦ ЕГС)
Павлов Виктор Михайлович (КФ ФИЦ ЕГС)
Перепелов Александр Борисович (ИГХ СО РАН)
Плечов Павел Юрьевич (МГУ, Минералогический музей имени А.Е. Ферсмана)
Пономарева Вера Викторовна (ИВиС ДВО РАН)
Салтыков Вадим Александрович (КФ ФИЦ ЕГС)
Свирид Илья Юрьевич (ИВиС ДВО РАН)
Сенюков Сергей Львович (КФ ФИЦ ЕГС)
Силаев Валерий Иванович (ИГ Коми НЦ УрО РАН)
Симонов Владимир Александрович (ИГМ СО РАН)
Соболевская Оксана Владимировна (КФ ФИЦ ЕГС)
Степанова Марина Юрьевна (ИФЗ РАН)
Сухарев Александр Евгеньевич (ИГ Коми НЦ УрО РАН)
Таран Юрий Александрович (ИВиС ДВО РАН)
Титков Николай Николаевич (КФ ФИЦ ЕГС)
Флеров Глеб Борисович (ИВиС ДВО РАН)
Чурикова Татьяна Георгиевна (ИВиС ДВО РАН)
Шапиро Николай Михайлович IPGP (Институт физики Земли, Париж)
Шевченко Алина Викторовна (ИВиС ДВО РАН)
Эдвардс Бенджамин Р. (США)
Яковлев Андрей Владимирович (ИНГГ СО РАН)

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение (Е.И. Гордеев, Н.Л. Добрецов)	3
Глава 1. ПРОИСХОЖДЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ (Н.Л. Добрецов, И.Ю. Кулаков, Е.И. Гордеев, А.Н. Василевский)	6
1.1. Зарождение Курило-Камчатской зоны субдукции и ее связь с эволюцией Тихоокеанского обрамления	8
1.2. Этапы кайнозойской коллизии на Камчатке и Курилах, тектоническая схема, изменения характера вулканизма	12
1.3. Строение Курило-Камчатской дуги по геофизическим данным	19
Глава 2. ВУЛКАНИЗМ ЦЕНТРАЛЬНОЙ КАМЧАТКИ И КЛЮЧЕВСКОЙ ГРУППЫ ВУЛКАНОВ	31
2.1. Этапы вулканизма Камчатки и плейстоцен-четвертичный вулканизм Восточного пояса (А.В. Перепелов)	31
2.1.1. Этапы вулканизма	31
2.1.2. Плейстоцен-четвертичный вулканизм Камчатки	34
2.2. Ключевская группа вулканов и Толбачинский вулканический массив: итоги исследований четвертичного вулканизма предшествующих извержению 2012–2013 гг. (Т.Г. Чурикова, Б.Н. Гордейчик, Б.Р. Эдвардс, В.В. Пономарева, Е.А. Зеленин)	36
2.2.1. Физико-географическое и тектоническое положение Централь- ной Камчатской депрессии и Ключевской группы вулканов	39
2.2.2. Вулканы Ключевской группы	41
2.2.3. Петрология и геохимия пород	43
2.2.4. Структура и морфология основания Толбачинского вулканического массива	46
2.2.5. Стратовулканы Острый Толбачик и Плоский Толбачик	48
2.2.6. Зона моногенных конусов и лавовых полей	50
2.2.7. История извержений Толбачинского вулканического массива	54
2.2.8. Петрология и геохимия Толбачинского вулканического массива	58
2.2.9. Происхождение двух серий вулканитов	65
2.2.10. Заключительные замечания	65
2.3. Эруптивная активность вулкана Плоский Толбачик в историческое время (Я.Д. Муравьев)	68
2.3.1. Сведения об активности и история извержений	69
2.3.2. Методика и результаты исследований	71
Глава 3. МОНИТОРИНГ ТОЛБАЧИНСКОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ 2012–2013 гг.	78
3.1. Сейсмический мониторинг извержения вулкана Плоский Толбачик 2012–2013 гг. (С.Л. Сеньюков, И.Н. Нуждина, С.Я. Дроздина, В.Т. Гарбузова, Т.Ю. Кожевникова, О.В. Соболевская, З.А. Назарова)	78
3.1.1. Сейсмологические наблюдения до 2000 г.	82
3.1.2. Сейсмологический мониторинг в 2000–2013 гг.	84
3.2. Количественные оценки параметров Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. по данным аэрофотограмметрических наблюдений (В.Н. Двигало, И.Ю. Свирид, А.В. Шевченко)	91
3.2.1. Методика работы	92
3.2.2. Строение системы трещин по фотограмметрическим данным	94

3.2.3. Характеристики последствий эффузивной деятельности	98
3.2.4. Данные по отложениям пирокластики	104
3.2.5. Состояние малой вершинной кальдеры Плоского Толбачика ...	105
3.3. Движения земной поверхности в зоне трещинных извержений на южном склоне вулкана Плоский Толбачик и в окрестностях вулкана Ключевской (Камчатка) (М.А. Магуськин, Ю.В. Демянчук, Н.Н. Титков, К.М. Магуськин)	109
3.4. Сейсмические и деформационные события, сопровождавшие подготовку и начало ТТИ-50 и отражавшие динамику магматической системы (Ю.А. Кугаенко, В.А. Салтыков, Н.Н. Титков, В.М. Павлов, П.В. Воропаев, Е.И. Иванова, И.Р. Абубакиров)	114
3.4.1. Пробуждение вулкана по сейсмическим и GPS-данным	115
3.4.2. Толудская вспышка сейсмичности и перемещения расплавов...	125
Глава 4. ПЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ, ГЕОХИМИЧЕСКАЯ И ИЗОТОПНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ТОЛБАЧИНСКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО МАССИВА (Т.Г. Чурикова, Б.Н. Гордейчик, Г.Б. Флеров, Х. Иватори, Х. Накамура, Т. Нишизава)	131
4.1. Геологическое положение	133
4.2. Аналитические методы	136
4.3. Полученные данные и обсуждение	148
4.4. Интерпретация полученных данных	156
4.5. Геохимическое развитие Толбачинского вулканического массива ...	170
Глава 5. ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПРОДУКТОВ ТОЛБАЧИНСКОГО ТРЕЩИННОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ ИМ. 50-ЛЕТИЯ ИВиС 2012—2013 гг.	173
5.1. Вещественный состав вулканических пород Толбачинского трещинного извержения 2012–2013 гг. (А.О. Волинец, Д.В. Мельников, И.Г. Грибоедова)	173
5.1.1. Отбор проб и аналитические методы	176
5.1.2. Результаты исследований: вещественный состав вулканических пород и минералов	177
5.1.3. Обсуждение результатов	210
5.2. Вулканические газы ТТИ-50 (М.Е. Зеленский, Н.А. Малик, Ю.А. Таран)	214
5.2.1. Методы отбора проб и анализа	215
5.2.2. Эруптивные газы	218
5.2.3. Микрокомпоненты в газах ТТИ-50	219
5.2.4. Коэффициент распределения газ–магма	229
5.2.5. Вынос элементов газами ТТИ-50	231
5.3. Особенности эксплозивной деятельности извержения ТТИ-50	234
5.3.1. Состав пеплов ТТИ-50 (Н.А. Малик)	234
5.3.2. Эксплозивная минерализация ТТИ-50 (Г.А. Карпов, В.И. Силаев, Л.П. Аникин, А.В. Мохов, Т.А. Горностаева, А.Е. Сухарев)	239
Глава 6. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТОЛБАЧИНСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ: ДАННЫЕ ПО ПЕТРОХИМИИ, ГЕОХИМИИ, ГАЗОВОМУ АНАЛИЗУ, ФАЗОВОМУ СОСТАВУ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ (В.А. Симонов, П.Ю. Плечов, Н.Л. Добрецов, А.В. Котляров, Н.А. Некрылов)	254
6.1. Введение и отбор образцов	254
6.2. Методы исследования	256
6.3. Петролого-минералогические особенности и химический состав изученных образцов	258
6.4. Расплавные включения в оливине и физико-химические параметры	267
6.4.1. Восстановление состава расплавов и их сравнение с составами пород	269

6.4.2. Включения в плагиоклазе	272
6.4.3. Основная масса и стёкла. Физико-химические параметры	274
6.5. Состав летучих компонентов в базальтах и в кристаллах-лапиллях плагиоклаза	276
6.6. Обсуждение результатов	283
Глава 7. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О ГЛУБИННОМ СТРОЕНИИ ПОД КЛЮЧЕВСКОЙ ГРУППОЙ ВУЛКАНОВ	293
7.1. Сейсмотомографические реконструкции земной коры и каналов магматического питания (<i>И.Ю. Кулаков, Е.И. Гордеев, Н.Л. Добрецов, С.Л. Сеньюков, И.Ф. Абкадыров, А.В. Яковлев, А.М. Новгородова, Е.В. Кукарина</i>)	293
7.1.1. Описание сейсмологических данных по временной сети на Толбачике	296
7.1.2. Алгоритм томографической инверсии	297
7.1.3. Оценка разрешения модели	302
7.1.4. Обсуждение результатов томографической инверсии	303
7.2. Развитие модели магматического питания по данным низкочастотного микросейсмического зондирования (<i>Ю.А. Кугаенко, В.А. Салтыков, А.В. Горбатиков, М.Ю. Степанова</i>)	315
7.2.1. Методика.....	317
7.2.2. Исходные данные	318
7.2.3. Результаты с элементами интерпретации	318
7.2.4. Основные особенности внутреннего строения магматической питающей системы, выявленные с применением ММЗ	324
7.2.5. Вулкан Плоский Толбачик и ТТИ-50	327
7.2.6. Толбачинский пьедестал	328
7.3. Эволюция свойств вулканического дрожания во время Толбачинского извержения 2012–2013 гг. на основе анализа кросс-корреляций непрерывных сейсмических записей (<i>Н.М. Шапиро, Д.В. Дроздин, С.Я. Дроздина, С.Л. Сеньюков, Е.И. Гордеев</i>).....	330
7.3.1. Эволюция амплитуды вулканического дрожания во время извержения	330
7.3.2. Функции кросс-корреляции вулканического дрожания	332
7.3.3. Матрицы коэффициентов корреляции	334
7.4. Геоэлектрическая модель района Толбачинского трещинного извержения (ТТИ-50) (<i>Ю.Ф. Мороз, В.А. Логинов</i>)	336
7.4.1. Краткая геолого-геофизическая характеристика района	337
7.4.2. Методика работ	339
7.4.3. Обработка и интерпретация данных МТЗ	339
7.4.4. Характеристика геоэлектрических разрезов	345
7.4.5. О возможной природе проводящих зон в земной коре	347
Глава 8. ОБ ИСТОЧНИКАХ ВУЛКАНИЗМА, ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ОЧАГАХ, АРЕАЛЬНЫХ ЗОНАХ И ПРОИСХОЖДЕНИИ ВЫСОКОКАЛИЕВЫХ БАЗАЛЬТОВ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ: СИНТЕЗ ПЕТРОЛОГИЧЕСКИХ И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ	351
8.1. Зоны плавления в субдуцирующей плите и промежуточные камеры (<i>Н.Л. Добрецов, Е.И. Гордеев, И.Ю. Кулаков, В.А. Симонов</i>)	353
8.1.1. Глубинные модели плавления и движения расплавов	353
8.1.2. Промежуточные камеры под Толбачиком и эволюция толбачинских базальтов	355
8.1.3. Протяженные линзы расплавов под Камчатской группой вулканов и взаимосвязь извержений Толбачика, Ключевского и Кизимена	359
8.1.4. Проблемы происхождения высококалийных базальтов	362

8.1.5. Сравнение базальтовых и андезитовых вулканов в зонах субдукции	365
8.2. Трещинные Толбачинские извержения и эволюция представлений об ареальном вулканизме (<i>Ю.А. Кугаенко, А.О. Волынец</i>)	366
8.3. Синтез петрологических и геофизических данных (<i>Н.Л. Добрецов, Е.И. Гордеев, И.Ю. Кулаков</i>)	372
8.3.1. Взаимосвязь процессов дегидратации и плавления в субдуцирующей плите с вышележащими промежуточными камерами субдукционных расплавов.....	372
8.3.2. Ориентировка полей напряжений и роль эпизодов аккреции и коллизии	374
ЗАКЛЮЧЕНИЕ (<i>Н.Л. Добрецов, Е.И. Гордеев</i>)	377
ЛИТЕРАТУРА	381
СПИСОК АВТОРОВ	415

Научное издание

**Толбачинское трещинное извержение 2012–2013 гг.
(ТТИ-50)**

Редактор *И. А. Абрамова*
Художественный редактор *О. М. Вараксина*
Художник *Е. Н. Сентябова*
Технический редактор *С. Ю. Бадалян*

Подписано в печать 12.12.2017. Формат 70×108 ¹/₁₆.
Уч.-изд. л. 36,5. Усл. печ. л. 36,8. Тираж 300 экз. Заказ № 252.

Издательство СО РАН
630090, Новосибирск, Морской просп., 2
E-mail: psb@sibran.ru
Тел. (383) 330-80-50
Отпечатано в Издательстве СО РАН
Интернет-магазин Издательства СО РАН
www.sibran.ru