



**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

Глава 4

ПЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ, ГЕОХИМИЧЕСКАЯ И ИЗОТОПНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ТОЛБАЧИНСКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО МАССИВА

В голоценовое время наибольшая вулканическая активность на Камчатском полуострове проявлялась в пределах Ключевской группы вулканов (КГВ). КГВ расположена в северной части Центральной Камчатской депрессии (ЦКД) на плато высотой около 1000 м и состоит из тринадцати вулканов, породы которых значительно отличаются друг от друга по петрографии, минералогии, содержанию кремнезема, по макро- и микроэлементному составу. Вопрос разнообразия вулканических пород является одним из наиболее острых среди вопросов магмообразования не только в КГВ, но и во всей Камчатской зоне субдукции. За последние десятилетия в отечественной и зарубежной печати появилось большое число работ, посвященных изучению пород КГВ [Хренов и др., 1991; Kersting, Arculus, 1994, 1995; Озеров и др., 1997; Pineau et al., 1999; Dorendorf et al., 2000; Миронов и др., 2001; Чурикова и др., 2001, 2012; Churikova et al., 2001, 2007; Portnyagin et al., 2007a, b; Turner et al., 2007], однако в большей части публикаций рассматриваются продукты исторических и голоценовых извержений. Более того, породы некоторых объектов КГВ не изучались вообще, некоторые объекты были обследованы в середине XX в., и об их породах известны лишь грубые петрохимические характеристики. Таким образом, геохимические и возрастные взаимоотношения вулканов Ключевской группы во многом остаются неясными. Вряд ли возможно понять эволюцию магматического вещества в пределах КГВ в пространстве и времени без рассмотрения вулканизма, происходившего в доголоценовое время как для каждого вулкана, так и для всего региона в целом.

Малоизученными объектами КГВ являются не только такие ныне потухшие вулканы, как Удины Сопки, Зимины Сопки и Горный Зуб, но и среднеплейстоцен-голоценовые вулканы Острый Толбачик и относящийся к активным Плоский Толбачик, на склонах которого в течение последних 10 тыс. лет активно работает зона моногенных шлаковых и шлаколавовых конусов, извергающих лавы различного химического состава (рис. 4.1). Геологическая история формирования Толбачинского массива с возрастным и вещественным разделением вулканических проявлений в голоцене, включая Большое трещинное Толбачинское извержение 1975–1976 гг. (БГТИ) на территории Толбачинского дола, представлена в работе [Брайцева и др., 1984а]. Голоценовым и историческим извержениям моногенных конусов и вулкана Плоский Толбачик посвящено более 900 российских и зарубежных публикаций, в том числе [Влодавец, 1937; Пийп, 1946, 1954; Попков, 1946; Меняйлов, 1953; Сирин, Фарберов, 1963; Кирсанов, Пономарев, 1974; Иванов, Хренов, 1979; Fedotov, Markhinin, 1983; Федотов, 1984; Кривенко, 1990; Kersting, 1995; Tatsumi et al., 1995; Hochstaedter et al., 1996; Kepezhinskas et al., 1997; Turner et al., 1998;



Рис. 4.1. Вид на Толбачинский вулканический массив с юга.

Слева – стратовулкан Острый Толбачик с обвальным цирком; справа – стратовулкан Плоский Толбачик. На переднем плане – лавовый поток извержения 2012–2013 гг., обтекающий конус Клешня. Фото Дмитрия Окопного

Pineau et al., 1999; Волынец и др., 2000; Чурикова и др., 2001; Churikova et al., 2001; Münker et al., 2004; Portnyagin et al., 2007a], более полный и подробный обзор работ, предшествующих извержению 2012—2013 гг., можно найти в [Churikova et al., 2015a]. В то же время петролого-геохимическая информация по плейстоценовому периоду развития Толбачинского массива практически отсутствует.

В семидесятых годах прошлого века была составлена геологическая карта Толбачинского массива [Ермаков, Важеевская, 1973], дано описание петрографического и минерального состава пород, а также получены первые химические анализы пород на макроэлементы [Ермаков, 1977]. Несмотря на огромный интерес к Большому трещинному Толбачинскому извержению 1975–1976 гг. и многочисленные публикации о разнообразном составе его продуктов, геохимические и изотопные исследования самих стратовулканов не проводились, и их вещественная эволюция и связь с зоной моногенного вулканизма до сих пор оставались неизвестными. Только после извержения 2012—2013 гг. появилось несколько работ, посвященных Толбачинскому массиву [Андреев, Топчиева, 2013; Флеров, Мелекесцев, 2013; Флеров и др., 2015].

Для определения мантийных и флюидных источников пород Толбачинского вулканического массива и выяснения взаимоотношений пород его разновозрастных комплексов в настоящей работе представлены геологические, петрографические, петрохимические, геохимические, изотопные данные, а также данные К-Аг датирования. В главе использована представительная коллекция из 155 образцов, собранная со всех перечисленных выше объектов Толбачинского массива, включая моногенные конусы различных возрастных групп [Брайцева и др., 1984б], вплоть до последнего извержения 2012–2013 гг. (рис. 4.2). Кроме того, были исследованы образцы горы Поворотной, расположенной в 8 км к северо-востоку от Плоского Толбачика, а также образцы лав основания КГВ, опробованных в обнажениях долины р. Студеной. Комплексное изучение Толбачинского вулканического массива позволило не только получить информацию по петрологии и геохимии самого массива, но также понять взаимоотношения пород массива с соседними вулканическими проявлениями в КГВ.

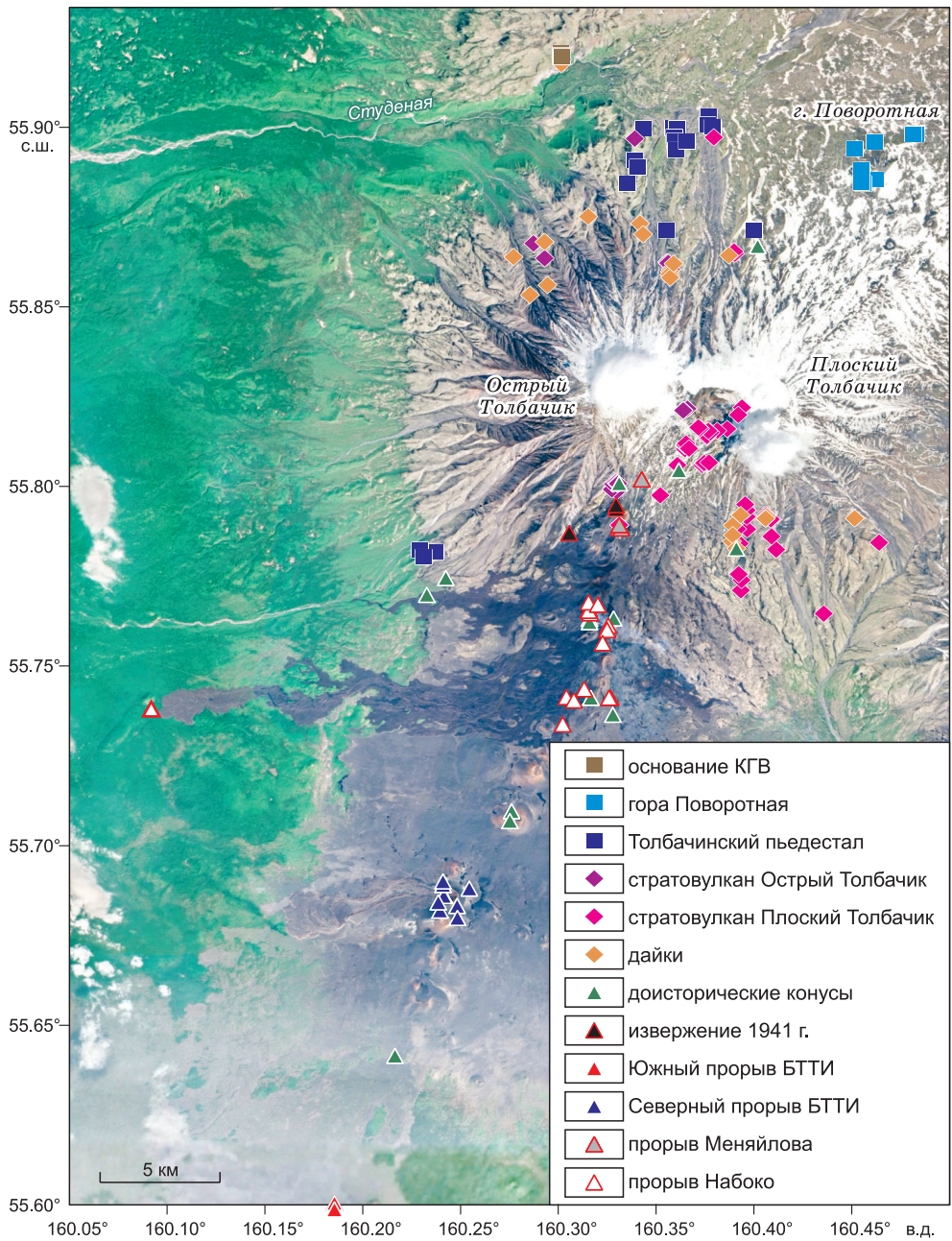


Рис. 4.2. Спутниковый снимок, показывающий Толбачинский вулканический массив. Отмечены места отбора образцов различных вулканических комплексов

4.1. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Основание КГВ представлено толщей высококалийных пород среднеплейстоценового возраста, обнажающейся в обрыве р. Студеной [Ермаков, 1977; Флеров и др., 2017]. По данным Ar-Ar датирования [Calkins, 2004] возраст пород составляет 274–262 тыс. лет. В позднем плейстоцене основание было разделено серией разломов на несколько тектонических блоков [Ме-

лекесцев и др., 1974]. Толбачинский вулканический массив образовался на тектонически нестабильном юго-западном блоке, который в настоящее время опущен приблизительно на 500 м относительно тектонически стабильных блоков, один из которых расположен к северу от него и подстилает вулканы Ключевской, Камень, Безымянный, Ушковский, Крестовский и Средний, а другой – к юго-востоку. Вулканы, ближайшие к Толбачинскому массиву, – Удины Сопки, Зимины Сопки, а также Горный Зуб – расположены вдоль границ блоков фундамента [Тимербаева, 1967; Мелекесцев и др., 1974].

Толбачинский вулканический массив занимает довольно протяженную зону от долины р. Студеной на севере до р. Толбачик на юге (см. рис. 4.2). Согласно геологической карте [Ермаков, Важеевская, 1973] геологическая история массива состоит из четырех последовательных этапов вулканической активности: 1) формирование пьедестала Толбачинского массива, 2) субсинхронный рост двух стратовулканов – Острого Толбачика и Плоского Толбачика, 3) развитие дайкового комплекса, 4) формирование наложенной зоны шлаковых и шлаколавовых моногенных конусов.

На этапе 1 формировался пьедестал Толбачинского массива с диаметром около 20 км и углами наклона склонов, не превышающими 5° . Пьедестал прослеживается по отдельным выходам в северном, северо-западном и юго-западном секторах массива. Выходы в настоящее время существенно задернованы, эродированы и представлены отдельными блоками, останцами и некками. В настоящее время на северном и западном склонах пьедестал частично разделен глубокими ледниковыми долинами, а в южном, юго-восточном и в восточном секторах он практически полностью перекрыт шлаком и лавовыми потоками более поздних извержений. Минералогическая особенность пород пьедестала – наличие так называемых авгитофировых пород, содержащих до 30 % авгита. Такие породы никогда не наблюдались не только среди других комплексов вулкана, но и среди других объектов КГВ.

На этапе 2 формировались стратовулканы Острый Толбачик и Плоский Толбачик, которые отличаются от пьедестала массива более крутыми (до $20\text{--}30^\circ$) склонами. Согласно геологическим наблюдениям, оба стратовулкана развивались субсинхронно [Ермаков, Важеевская, 1973; Брайцева и др., 1984а]. Вулкан Острый Толбачик является потухшим, в то время как многократные вершинные извержения на вулкане Плоский Толбачик известны в течение голоцена и наблюдались в историческое время.

Аналогично другим крупным вулканическим постройкам КГВ [Мелекесцев и др., 1991; Хренов и др., 1991; Чурикова и др., 2012], внутренняя часть стратовулканов сложена мощными пирокластическими толщами, что свидетельствует об эксплозивном характере извержений стратовулканов на первых стадиях их формирования. Более поздние стадии характеризовались преимущественно эффузивными извержениями, в результате чего образовался лавовый покров на всех склонах вулканов. В настоящее время верхние части построек покрыты мощными ледниками, которые спускаются ледовыми потоками в большинство долин массива.

Породы стратовулканов представлены массивными или плитчатыми лавами различной пористости – от плотных текстур до шлаковидных разностей. Структуры пород меняются от субафировых до серийно-порфириновых и крупнопорфириновых. Основными породообразующими минералами являются оливин (Ol), клинопироксен (Cpx), плагиоклаз (Pl), магнетит (Mt) и в меньшей степени ортопироксен (Opx).

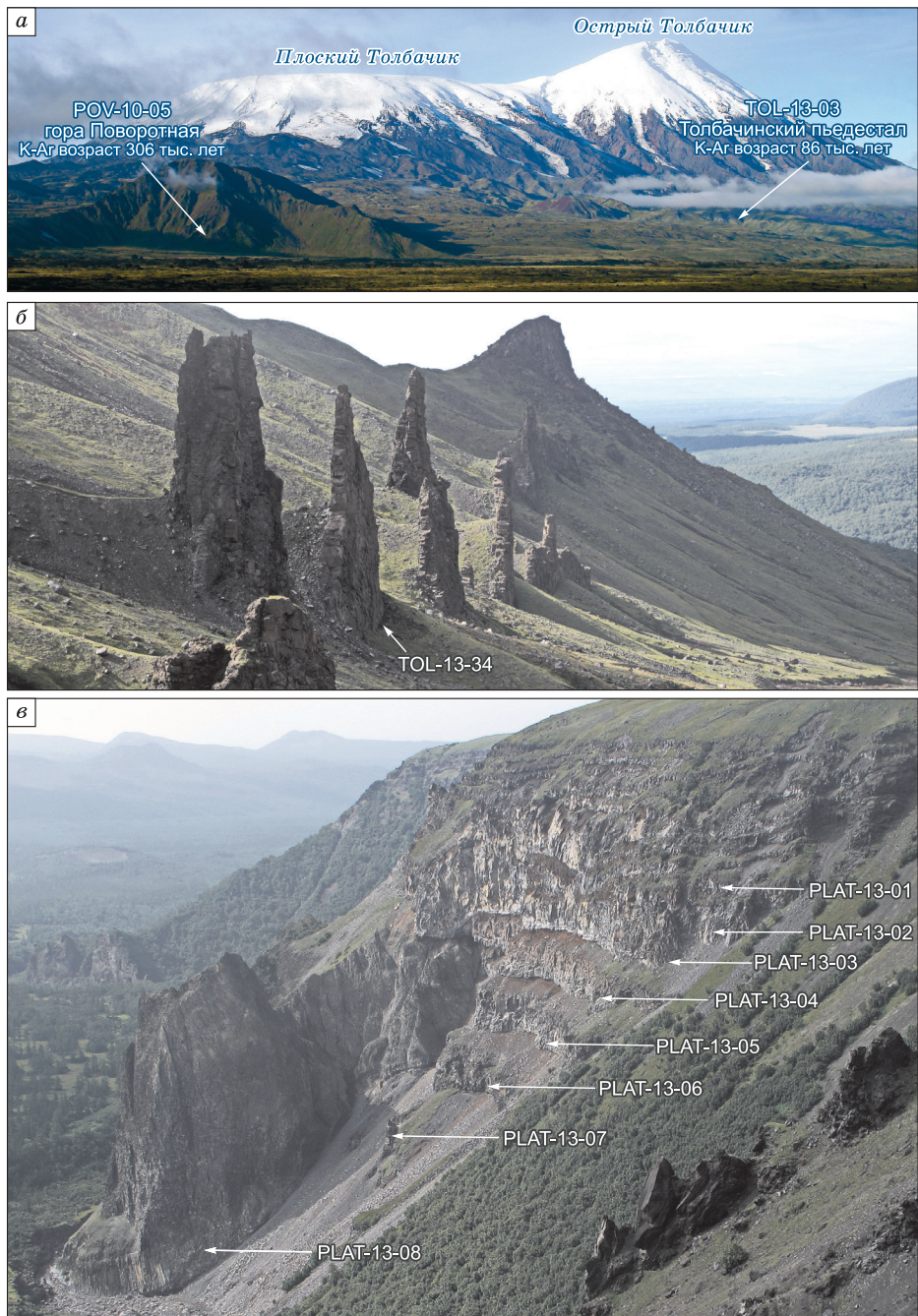


Рис. 4.3. Различные структурные комплексы Толбачинского вулканического массива и окружающие его объекты.

а – вид на Толбачинский вулканический массив и гору Поворотную с севера. Места отбора проб, датированных К-Аг методом, показаны стрелками; *б* – мощная протяженная дайка в долине Дачечной на северо-западном склоне вулкана Острый Толбачик; *в* – обнажение основания КГВ в долине р. Студеной. Образец PLAT-13-08 относится к некку, стоящему вблизи обнажения

На этапе 3 развивался дайковый комплекс. Многочисленные радиальные и кольцевые дайки пересекают обе постройки стратовулканов во всех секторах. Мощность даек составляет от 1 до 10 м, а их длина может достигать 2 км (рис. 4.3, б). Большинство даек представлено породами, аналогичными поро-

дам стратовулканов. Кроме того, в северо-западном секторе вулкана Острый Толбачик имеются дайки, обогащенные до 25–30 % темноцветными минералами, в то время как в южном и юго-восточном секторах стратовулкана Плоский Толбачик встречаются мегаплагиофировые и тонкополосчатые разности. Большие вариации в химическом составе даек предполагают несколько этапов их внедрения.

На этапе 4, который начался около 10 тыс. лет назад (л. н.) и продолжается до настоящего времени, образовалась зона моногенных конусов, вытянутая вдоль предполагаемой трещины юго-юго-западного–северо-восточного простирания. Конусы состоят в основном из шлака, но часто формируют лавовые потоки длиной до 10 км. В течение 10–2 тыс. л.н. в зоне извергались только субщелочные высокоглиноземистые базальты. Около 2 тыс. л.н. начался так называемый «контрастный» период извержений, в течение которого извергались как высокоглиноземистые, так и высокомагнезиальные базальты [Брайцева и др., 1984а; Флеров, Мелекесцев, 2013; Флеров и др., 2015].

Геологические процессы этого периода, включающие развитие трещинной зоны и ее пересечение с вершиной (еще острой в то время) Плоского Толбачика, привели к обрушению стратовулкана с образованием кальдеры диаметром 3 км. Острый Толбачик также испытал серию обрушений в этот период [Брайцева и др., 1984а; Ponomareva et al., 2006; Флеров и др., 2015], крупнейший обвал был направлен на юго-восток (см. рис. 4.1, 4.2).

Мы опробовали лавы всех комплексов Толбачинского массива в различных секторах. Северо-восточный и юго-западный сектора плотно перекрыты продуктами последних извержений, породы пьедестала здесь не выходят на поверхность, и их опробование невозможно. Была опробована гора Поворотная, расположенная в 8 км к северо-востоку от Плоского Толбачика (см. рис. 4.3, а), а также основание КГВ, обнажение которого находится к северу от Толбачинского массива в долине р. Студеной (см. рис. 4.3, в).

Несмотря на то что Толбачинский вулканический массив является подстилающей основой, на которой развивалась наложенная зона моногенного вулканизма, вызвавшая оживленный интерес исследователей во всем мире, современные геохимические методы до сих пор не применялись для изучения пьедестала, стратовулканов и даек, а взаимоотношения их пород с породами конусов и с породами других вулканов КГВ до сих пор не изучены. Более того, формирование и эволюция пьедестала Толбачинского массива остаются белым пятном ранней истории развития всей КГВ.

4.2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Макроэлементы в породах анализировались в Токийском университете, результаты представлены в табл. 4.1, а также в работе [Churikova et al., 2015b]. Макроэлементы в 155 образцах, включая восемь образцов лав горы Поворотной и шесть образцов андезибазальтового плато под КГВ, определялись методом XRF по стандартной методике на сплавленных дисках, приготовленных как смесь 400 мг пудры породы с тетраборатом лития. Аналитические ошибки относительно международных стандартов JA-2, JB-2 и JB-3 по SiO_2 , Al_2O_3 , CaO и Na_2O оказались меньше 1 %, для других элементов – около 2 %.

Микроэлементы в 102 образцах анализировались методом ICPMS в Токийском технологическом институте (ТИТЭСН), результаты представлены в табл. 4.2, а также в работе [Churikova et al., 2015b]. Около 50 мг порошка

Таблица 4.1

Макроэлементный состав, координаты опробования и описание образцов представительных пород Толбачинского вулканического массива, горы Поворотной и основания КГВ

Образец	TOL-12-13	TOL-12-15	TOL-13-04	TOL-12-38	TOL-12-53	TOL-13-55	TOL-12-62	TOL-13-23	TOL-13-24	TOL-13-26
	Стратовулкан Плоский Толбачик						Стратовулкан Острый Толбачик			
Комплекс										
Тренд	2	2	2	2	1	2	2	1	1	1
Широта (с.ш.)	55°48'50.6"	55°48'54.1"	55°53'49.9"	55°47'2.8"	55°45'52.5"	55°47'21.2"	55°48'2.5"	55°51'44.9"	55°51'44.8"	55°51'37.6"
Долгота (в.д.)	160°22'33.7"	160°22'39.8"	160°22'46.2"	160°23'33.8"	160°26'8.5"	160°19'52.2"	160°19'40.9"	160°21'20.5"	160°21'21.8"	160°21'25.3"
Высота, м	2879	3002	1255	1652	1118	1968	2010	1705	1724	1836
Описание образца	Кратерный конус	Кратерный конус, верхняя часть	Самый нижний поток, метатлафириновый базальт	Лавовый поток	Нижняя часть	Отложения под лавой извержения 2012 г.	Лавовый поток	О1-Срх базальт	О1-Срх андезитобазальт, выше TOL-13-23	О1-Срх андезитобазальт, выше TOL-13-24
SiO ₂	50.406	50.41	50.538	49.977	55.871	49.691	51.009	51.953	53.423	52.825
TiO ₂	1.531	1.542	1.717	1.48	0.955	1.172	1.441	1.087	1.027	1.036
Al ₂ O ₃	16.561	17.117	16.817	16.33	19.647	14.079	16.619	17.762	17.245	17.303
Fe ₂ O ₃	10.977	10.65	10.765	12.095	7.198	10.382	10.611	10.215	9.512	9.528
MnO	0.152	0.14	0.179	0.171	0.122	0.179	0.169	0.195	0.181	0.181
MgO	4.828	4.312	4.382	5.267	2.118	9.017	4.836	4.639	4.803	4.766
CaO	8.558	8.312	8.366	8.671	6.969	10.2	8.357	8.724	8.28	8.309
Na ₂ O	3.219	3.183	3.344	3.021	4.18	2.626	3.241	3.1	3.119	3.175
K ₂ O	1.818	1.858	2.088	1.504	1.8	1.21	1.909	1.176	1.289	1.318
P ₂ O ₅	0.513	0.563	0.637	0.393	0.366	0.332	0.565	0.267	0.262	0.264
Сумма	98.563	98.087	98.833	98.909	99.226	98.888	98.757	99.118	99.141	98.705

Образец	Дайка										ТОЛ-13-30	ТОЛ-13-32
	ТОЛ-13-33	ТОЛ-12-25	ТОЛ-12-27	ТОЛ-12-50	ТОЛ-12-58	ТОЛ-13-18	ТОЛ-13-27	ТОЛ-13-29	ТОЛ-13-30	ТОЛ-13-32		
Комплекс	Страговулкан Острый Толбачик											
Тренд	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1
Ширина (с.ш.)	55°52'3.5"	55°49'17.9"	55°49'16.5"	55°47'27.8"	55°46'57.7"	55°52'23.4"	55°51'35.2"	55°51'29.3"	55°51'43.2"	55°52'5"		
Долгота (в.д.)	160°17'14.2"	160°21'57.5"	160°21'50.2"	160°24'21.5"	160°23'27.7"	160°20'30.2"	160°21'25.3"	160°21'25.8"	160°21'32.2"	160°17'34.5"		
Высота, м	1470	2813	2750	1613	1584	1503	1866	1929	1781	1305		
Описание образца	Срх-Р1 андезизальт, бронзирующий лавовый поток между долинами Даечная и Виноградова	Верхняя часть, лавовый поток	Лавовый поток под ТОЛ-12-25	Плоский Толбачик, южный сектор	Полосчатая дайка, Плоский Толбачик, южный сектор	Срх-Р1 андезизальт, Острый Толбачик, около ледника Будникова	Р1 андезизальт, Острый Толбачик, над точкой ТОЛ-13-26	Субафировый андезизальт, Острый Толбачик	О1-Срх андезизальт, Острый Толбачик	О1-Срх андезизальт, Острый Толбачик	О1-Срх андезизальт, Острый Толбачик	О1-Срх андезизальт, Острый Толбачик
	SiO ₂	51.32	50.713	51.121	52.621	52.009	52.926	52.819	52.116	52.132		
TiO ₂	1.034	1.097	1.66	1.12	1.118	1.118	0.964	1.052	1.114	0.843		
Al ₂ O ₃	17.694	17.968	17.852	17.257	17.257	17.853	18.978	17.627	16.823	18.418		
Fe ₂ O ₃	9.82	9.744	10.187	9.837	9.837	9.812	8.644	9.646	10.042	9.182		
MnO	0.15	0.144	0.129	0.142	0.142	0.175	0.168	0.185	0.182	0.192		
MgO	5.019	4.888	3.123	5.072	5.072	4.094	3.503	4.621	5.535	4.128		
CaO	8.352	8.83	8.312	8.709	8.709	8.066	7.977	8.223	8.634	8.574		
Na ₂ O	2.963	3.049	3.526	3.091	3.091	3.237	3.343	3.187	3.007	3.293		
K ₂ O	1.277	1.267	2.032	1.336	1.336	1.263	1.359	1.313	1.19	1.237		
P ₂ O ₅	0.257	0.264	0.562	0.284	0.284	0.29	0.267	0.271	0.265	0.303		
Сумма	97.886	97.964	98.504	99.469	99.469	97.917	98.129	98.944	98.908	98.302		

Образец	TOL-13-34	TOL-13-39	TOL-13-43	TOL-13-46	TOL-13-48	TOL-12-06	TOL-12-31	TOL-12-67	TOL-12-30	TOL-12-29
Комплекс	Дайка		Конус							
Тренд	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2
Широта (с.ш.)	55°51'50"	55°52'30.4"	55°52'0.7"	55°44'11.2"	55°45'47.7"	55°48'16"	55°46'28.1"	55°48'3"	55°46'11.3"	55°47'13.2"
Долгота (в.д.)	160°16'37.5"	160°18'54.8"	160°24'7"	160°19'40.4"	160°19'41.6"	160°21'41.9"	160°14'32.9"	160°19'52"	160°13'57.9"	160°18'20.1"
Высота, м	1215	1440	1647	606	1625	2466	1035	2158	958	1561
Описание образца	О1-Срх базальт, Острый Толбачик, Дачная долина	О1-Срх андезит-базальт, Острый Толбачик, северный сектор	О1-Срх-Р1 базальт, северо-северо-восточная ветвь	Р1 базальт, старый конус, юго-юго-западная ветвь	О1-Р1 базальт, юго-западная ветвь	Шлакоаво-вый конус, юго-юго-западная ветвь	Острый Толбачик, юго-западная ветвь	Плоский Толбачик, юго-юго-западная ветвь	Острый Толбачик, юго-западная ветвь	Извержение 1941 г.
SiO ₂	51.432	52.927	50.713	51.147	51.032	51.214	51.082	49.985	50.238	49.32
TiO ₂	0.996	0.976	1.277	1.474	1.371	1.413	1.428	1.582	1.696	1.243
Al ₂ O ₃	15.328	17.402	18.545	17.103	17.292	17.055	17.255	15.939	16.654	14.29
Fe ₂ O ₃	9.876	9.244	10.719	10.41	10.121	10.722	10.481	11.281	11.989	10.709
MnO	0.183	0.171	0.197	0.173	0.168	0.146	0.148	0.183	0.156	0.171
MgO	7.591	5.202	4.427	4.708	4.87	4.536	4.009	5.252	4.585	8.682
CaO	9.6	8.405	8.895	8.564	8.911	8.565	8.068	8.646	7.901	9.808
Na ₂ O	2.758	3.253	3.288	3.365	3.326	3.332	3.308	3.042	3.315	2.736
K ₂ O	1.052	1.197	0.939	1.729	1.553	1.816	1.82	1.766	1.808	1.357
P ₂ O ₅	0.219	0.224	0.271	0.478	0.421	0.491	0.481	0.526	0.536	0.371
Сумма	99.035	99.001	99.271	99.151	99.065	99.29	98.08	98.202	98.878	98.687

Продолжение табл. 4.1

Образец	TOL-13-79	TOL-13-80	TOL-13-81	TOL-13-82	TOL-13-50	TOL-13-51	TOL-13-54	TOL-13-56	TOL-13-57	TOL-13-76	
Конус											
Тренд	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	
Широта (с.ш.)	55°41'9.8"	55°41'9.5"	55°41'3.1"	55°40'47.5"	55°47'17.9"	55°47'17.8"	55°47'21.2"	55°48'7"	55°48'7"	55°44'36.8"	
Долгота (в.д.)	160°14'30"	160°14'29.1"	160°14'19"	160°14'54.3"	160°19'51.4"	160°19'55.9"	160°19'52.2"	160°20'33.6"	160°20'33.6"	160°18'47.7"	
Высота, м	1131	1092	1109	993	1949	1942	1968	2255	2255	1401	
Описание образца	Северный прорыв 1975–1976 гг., конус # 2	Северный прорыв 1975–1976 гг., бомба у основания конуса # 2	Северный прорыв 1975–1976 гг., конус # 1, лавовый поток	Северный прорыв 1975–1976 гг., бомба у основания конуса # 1	Извержение 2012–2013 гг., прорыв Меньяилова						Извержение 2012–2013 гг., прорыв Набоко, около конуса Клешня
	Северный прорыв 1975–1976 гг., конус # 2	Северный прорыв 1975–1976 гг., бомба у основания конуса # 2	Северный прорыв 1975–1976 гг., конус # 1, лавовый поток	Северный прорыв 1975–1976 гг., бомба у основания конуса # 1							50.038
SiO ₂	50.038	50.4	49.551	50.101	53.975	54.206	54.008	53.961	53.703	50.829	
TiO ₂	1.34	1.36	1.108	0.957	1.735	1.739	1.746	1.739	1.723	1.981	
Al ₂ O ₃	15.622	15.824	14.004	13.398	16.341	16.383	16.41	16.363	16.247	15.859	
Fe ₂ O ₃	10.425	10.278	10.323	10.312	9.693	9.626	9.688	9.722	9.6	11.642	
MnO	0.198	0.174	0.193	0.204	0.195	0.183	0.185	0.203	0.185	0.198	
MgO	6.92	6.672	8.99	9.661	2.965	2.925	3.012	2.956	2.964	4.061	
CaO	9.356	9.349	10.537	11.706	6.791	6.729	6.838	6.76	6.758	7.343	
Na ₂ O	2.999	3.06	2.556	2.329	3.929	3.954	3.947	3.928	3.906	3.561	
K ₂ O	1.51	1.548	1.111	0.817	2.649	2.679	2.652	2.656	2.63	2.418	
P ₂ O ₅	0.422	0.431	0.292	0.203	0.766	0.784	0.768	0.776	0.768	0.731	
Сумма	98.83	99.096	98.665	99.688	99.039	99.208	99.254	99.064	98.484	98.623	

Образец	TOL-13-47	TOL-13-49	TOL-13-58	TOL-13-59	TOL-13-77	TOL-13-78	TOL-13-84	TOL-13-85	TOL-13-86	TOL-13-87
Комплекс	Конус									
Тренд	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Широта (с.ш.)	55°46'3.7"	55°45'40.5"	55°45'36.1"	55°44'28.8"	55°44'25.5"	55°44'1.5"	55°45'23"	55°44'28"	55°44'28.1"	55°44'28.1"
Долгота (в.д.)	160°18'55.7"	160°19'32"	160°19'29.8"	160°18'14.8"	160°18'28.6"	160°18'8.1"	160°19'21.5"	160°19'34.9"	160°19'36.4"	160°19'33.4"
Высота, м	1683	1597	1597	1680	1342	1265	1558	1370	1384	1384
Описание образца	Кратерный конус 2012–2013 гг., прорыв Набоко	Лавовый поток 2012–2013 гг., прорыв Набоко	Лава прорыва Набоко, 22–27 декабря 2012 г.	Бомба из кратера, прорыв Набоко, 03.09.2013	Западный лавовый поток извержения Набоко 2012–2013 гг.	Восточный лавовый поток извержения Набоко 2012–2013 гг.	Восточный лавовый поток извержения Набоко 2012–2013 гг.	Восточный лавовый поток извержения Набоко 2012–2013 гг.	Восточный лавовый поток извержения Набоко 2012–2013 гг.	Восточный лавовый поток извержения Набоко 2012–2013 гг.
SiO ₂	51.181	50.986	50.838	50.572	50.815	50.699	50.56	51.116	50.748	50.981
TiO ₂	1.968	1.979	1.975	1.962	1.984	1.976	1.974	1.996	1.983	2
Al ₂ O ₃	15.945	15.969	15.888	15.845	15.85	15.864	15.8	16.042	15.893	15.915
Fe ₂ O ₃	11.592	11.642	11.579	11.518	11.595	11.586	11.534	11.67	11.65	11.585
MnO	0.189	0.199	0.188	0.184	0.182	0.188	0.184	0.186	0.189	0.176
MgO	4.102	4.028	4.012	4.077	4.086	4.023	4.052	4.095	4.07	4.076
CaO	7.334	7.393	7.387	7.352	7.358	7.342	7.311	7.365	7.33	7.354
Na ₂ O	3.557	3.569	3.536	3.532	3.545	3.527	3.495	3.54	3.512	3.552
K ₂ O	2.411	2.411	2.406	2.392	2.415	2.398	2.395	2.418	2.415	2.433
P ₂ O ₅	0.727	0.726	0.726	0.727	0.731	0.728	0.725	0.737	0.731	0.737
Сумма	99.006	98.902	98.535	98.161	98.561	98.331	98.03	99.165	98.521	98.809

Продолжение табл. 4.1

Образец	GF-13-13	GF-13-14	GF-13-15	GF-13-16	GF-13-17	TOL-13-44	TOL-12-33	TOL-13-01	TOL-13-03	TOL-13-07
	Конус			Пьедестал						
Комплекс	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
Тренд	55°45'52.9"	55°45'56.8"	55°45'56.8"	55°45'55.4"	55°45'55.4"	55°52'17"	55°46'56.4"	55°54'11"	55°54'0.1"	55°53'58.9"
Широта (с.ш.)	160°18'59.1"	160°18'56.4"	160°18'56.4"	160°18'56.2"	160°18'56.2"	160°24'0.4"	160°13'45.4"	160°22'36.7"	160°22'44.7"	160°21'38.6"
Долгота (в.д.)	1621	1666	1666	1664	1664	1564	1078	1178	1214	1173
Высота, м										
Описание образца	Извержение 2012–2013 г., около кратера Набоко									
SiO ₂	50.732	50.718	51.236	50.735	50.548	52.082	50.172	51.614	52.479	51.519
TiO ₂	1.975	1.95	1.937	1.949	1.956	1.044	1.034	0.947	1.233	0.965
Al ₂ O ₃	15.851	15.753	15.622	15.824	15.881	18.237	14.414	13.57	18.499	13.68
Fe ₂ O ₃	11.521	11.426	11.328	11.407	11.42	9.484	10.208	10.004	9.613	10.072
MnO	0.181	0.186	0.178	0.18	0.179	0.188	0.151	0.196	0.181	0.187
MgO	4.046	4.049	4.024	4.037	4.068	4.078	8.333	8.894	4.167	9.084
CaO	7.364	7.311	7.243	7.312	7.344	8.688	9.93	10.429	8.586	10.624
Na ₂ O	3.483	3.507	3.454	3.493	3.497	3.254	2.566	2.396	3.447	2.39
K ₂ O	2.389	2.379	2.399	2.441	2.431	1.317	0.815	0.877	1.189	0.864
P ₂ O ₅	0.726	0.72	0.715	0.721	0.72	0.298	0.179	0.194	0.271	0.198
Сумма	98.268	97.999	98.136	98.099	98.044	98.67	97.802	99.121	99.665	99.583

Старый Толбачик, под ледником Института вулканологии

Старый Толбачик

Ой-Срх-Ри базальт, Плоский Толбачик

Плоский Толбачик

Плоский Толбачик

Острый Толбачик, авгитофир

Образец	TOL-13-09	TOL-13-10	TOL-13-15	TOL-13-16	TOL-13-17	TOL-13-21	TOL-13-31	POV-10-03	POV-10-04	POV-10-05
Комплекс	Пьедестал				Гора Поворотная					
	Тренд	Тренд	Тренд	Тренд	Тренд	Тренд	Тренд	Тренд	Тренд	Тренд
Широга (с.п.)	55°53'46.3"	55°53'37.1"	55°53'3.5"	55°53'20.3"	55°53'27.2"	55°53'19.7"	55°52'16.6"	55°53'38.4"	55°53'17.3"	55°53'4.3"
Долгота (в.д.)	160°21'34.9"	160°21'36.2"	160°20'6.1"	160°20'24.1"	160°20'20.4"	160°20'26.4"	160°21'18.9"	160°27'5.7"	160°27'18"	160°27'18"
Высота, м	1282	1327	1429	1303	1303	1580	1596	1443	1736	1600
Описание образца	Срх-Р1 андезибазальт, Острый Толбачик	Срх-О1 андезибазальт, Острый Толбачик	Субафировый базальт, Острый Толбачик	О1-Срх-Р1 базальт, Острый Толбачик	2Рх-Р1 андезибазальт, Острый Толбачик	Авгитофировый андезибазальт, Острый Толбачик				
SiO ₂	54.732	55.042	52.81	51.165	52.226	52.257	52.824	52.098	53.188	53.005
TiO ₂	0.905	0.906	1.046	1.029	1.051	1.035	1.045	0.936	0.945	0.905
Al ₂ O ₃	18.296	18.218	16.021	16.724	16.065	15.646	17.647	14.244	15.778	15.578
Fe ₂ O ₃	8.358	8.277	9.507	9.768	9.775	9.887	9.602	9.201	8.983	8.912
MnO	0.167	0.164	0.178	0.185	0.182	0.178	0.178	0.143	0.139	0.154
MgO	3.812	3.689	6.121	5.72	6.526	6.393	4.669	8.663	6.412	6.837
CaO	7.912	7.679	8.767	9.28	9.034	9.203	8.235	9.179	8.585	8.906
Na ₂ O	3.405	3.458	2.943	2.915	2.983	2.851	3.197	2.829	3.093	3.003
K ₂ O	1.427	1.485	1.09	1.058	1.074	1.099	1.319	1.226	1.359	1.22
P ₂ O ₅	0.269	0.273	0.222	0.212	0.22	0.234	0.267	0.254	0.243	0.215
Сумма	99.283	99.191	98.705	98.056	99.136	98.783	98.983	98.773	98.725	98.735

Образец	POV-10-05	POV-10-08	PLAT-13-01	PLAT-13-02	PLAT-13-03	PLAT-13-05	PLAT-13-06
Комплекс	Основание КГВ						
	Тора Поворотная						
Тренд	1	1					
Ширина (с.ш.)	55°53'4.3"	55°53'53.1"	55°55'14.2"	55°55'14.2"	55°55'14.2"	55°55'11"	55°55'10.3"
Долгота (в.д.)	160°27'18"	160°28'52.9"	160°18'3.7"	160°18'3.7"	160°18'4.6"	160°18'5.7"	160°18'6"
Высота, м	1600	1506	1125	1115	1100	1040	1015
Описание образца	Тора Поворотная		Субафировый андезит-базальт, верхняя часть	Субафировый андезит-базальт, ниже образца PLAT-13-01	Субафировый андезит-базальт, ниже образца PLAT-13-02	Субафировый андезит-базальт, ниже образца PLAT-13-03	Субафировый андезит-базальт, нижняя часть
SiO ₂	53.005	53.386	53.467	54.094	53.924	54.01	53.791
TiO ₂	0.905	1.005	1.669	1.7	1.686	1.715	1.704
Al ₂ O ₃	15.578	17.253	16.083	16.299	16.421	16.492	16.49
Fe ₂ O ₃	8.912	8.853	9.987	10.204	10.146	9.741	9.68
MnO	0.154	0.147	0.156	0.165	0.162	0.155	0.15
MgO	6.837	5.297	3.271	3.325	3.286	3.385	3.379
CaO	8.906	8.344	6.872	6.896	6.948	7.039	7.04
Na ₂ O	3.003	3.438	3.577	3.644	3.663	3.568	3.544
K ₂ O	1.22	1.364	2.093	2.126	2.122	2.18	2.163
P ₂ O ₅	0.215	0.229	0.59	0.603	0.595	0.641	0.636
Сумма	98.735	99.316	97.765	99.056	98.953	98.926	98.577

Примечание. Все макроэлементы определялись методом РФА в Токийском университете и даны в мас. %. Полный набор данных можно найти в работе [Churikova et al., 2015b], в том числе в электронном приложении к ней.

Таблица 4.2

**Микроэлементный состав представительных пород Толбачинского
вулканического массива, горы Поворотной и основания КГВ**

Обра- зец	TOL- 12-15	TOL- 12-38	TOL- 12-53	TOL- 12-62	TOL- 13-24	TOL- 12-50	TOL- 12-58	TOL- 13-34	TOL- 13-43	TOL- 12-06	TOL- 12-31	TOL- 12-67
Комп- лекс	ПТ			ОТ		Дайка			Конус			
Тренд	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2	2
Cr	73	94	10	62	52	33	51	199	22	99	83	101
Ni	33	44	7	34	18	21	17	58	16	38	38	40
Cu	159	163	40	209	42	232	62	51	69	178	347	192
Zn	99	103	70	93	98	109	82	93	101	99	98	101
Rb	55.59	38.46	30.47	59.24	22.64	59.18	27.51	17.92	14.89	51.94	76.52	56.10
Sr	367	391	416	358	471	473	427	375	395	484	313	378
Y	37.17	38.36	29.62	35.97	19.79	40.08	27.41	18.96	26.56	34.36	47.03	40.48
Zr	243	195	186	256	96	277	122	86	115	213	367	251
Nb	6.29	4.66	4.02	4.96	2.74	6.70	2.97	2.30	3.14	5.73	7.36	5.91
Cd	0.15	0.14	0.11	0.15	0.09	0.16	0.10	0.08	0.11	0.14	0.16	0.16
Sn	1.28	0.83	0.45	0.73	0.61	1.09	0.71	0.59	0.21	1.31	1.38	1.13
Cs	1.61	1.04	0.53	1.81	0.59	1.48	0.76	0.26	0.32	1.40	2.23	1.64
Ba	476	497	518	503	397	605	499	316	284	523	590	473
La	16.90	14.25	11.57	18.80	8.48	19.82	10.79	7.28	7.82	15.89	22.26	17.81
Ce	41.52	35.36	28.45	45.13	21.11	47.87	26.01	18.51	20.95	38.34	53.99	43.96
Pr	5.84	5.12	4.02	6.16	3.13	6.63	3.78	2.84	3.23	5.39	7.50	6.18
Nd	27.87	25.27	19.35	28.80	15.23	31.14	18.59	14.30	16.36	25.63	35.39	29.31
Sm	6.94	6.63	4.93	7.00	3.70	7.48	4.96	3.70	4.33	6.36	8.68	7.35
Eu	1.95	1.93	1.54	1.91	1.22	2.14	1.55	1.21	1.44	1.85	2.35	2.06
Gd	7.23	7.23	5.22	7.25	4.05	7.70	5.33	4.11	4.95	6.71	9.09	7.92
Tb	1.08	1.09	0.79	1.05	0.61	1.10	0.80	0.62	0.78	0.99	1.36	1.18
Dy	6.55	6.67	4.85	6.26	3.84	6.48	4.89	3.80	5.00	6.06	8.18	7.14
Ho	1.15	1.17	0.86	1.09	0.78	1.12	0.85	0.76	1.03	1.06	1.42	1.26
Er	3.63	3.71	2.79	3.43	2.25	3.53	2.68	2.18	2.99	3.37	4.49	3.98
Tm	0.61	0.62	0.48	0.58	0.32	0.59	0.45	0.31	0.43	0.57	0.75	0.68
Yb	3.80	3.87	2.98	3.59	2.14	3.67	2.79	2.02	2.87	3.53	4.69	4.19
Lu	0.59	0.59	0.47	0.55	0.33	0.56	0.43	0.31	0.44	0.54	0.72	0.64
Hf	5.14	4.21	3.73	4.98	2.45	5.07	3.12	2.25	2.81	4.54	6.89	5.10
Ta	0.42	0.30	0.24	0.21	0.17	0.35	0.16	0.16	0.20	0.37	0.40	0.34
Pb	5.65	4.79	4.56	6.07	3.22	6.16	3.97	2.05	2.11	5.89	7.31	5.53
Th	2.02	1.40	1.27	2.22	0.84	1.99	0.98	0.75	0.61	1.79	2.68	1.91
U	1.27	0.88	0.78	1.36	0.52	1.29	0.66	0.45	0.37	1.13	1.72	1.24

Окончание табл. 4.2

Образец	TOL-12-30	TOL-12-29	TOL-13-56	TOL-13-59	TOL-12-33	TOL-13-03	TOL-13-07	POV-10-03	POV-10-04	PLAT-13-03	PLAT-13-06
Комплекс	Конус				Пьедестал			Гора Поворотная		Основание КГВ	
Тренд	2	2	2	2	1	1	1	1	1		
Cr	31	745	17	45	326	41	271	384	145	16	20
Ni	58	231	10	34	81	21	68	85	35	27	26
Cu	452	281	203	267	45	77	50	66	52	265	201
Zn	135	72	110	118	73	105	85	70	75	103	96
Rb	87.70	41.52	70.28	64.77	13.85	21.08	14.99	16.17	23.41	49.99	51.76
Sr	297		348	338	296	455	345	468	462	384	369
Y	55.19	28.42	39.43	37.72	21.36	23.24	17.71	19.40	20.86	34.18	34.38
Zr	424	209	291	276	78	108	74	89	99	264	259
Nb	8.77	4.93	6.59	6.59	2.04	3.20	1.49	1.87	2.70	6.13	4.91
Cd	0.19	0.10	0.18	0.17	0.08	0.10	0.08	0.08	0.09	0.16	0.17
Sn	2.29	1.48	1.93	0.70	0.86	0.68	1.52	1.01	0.72	1.96	2.18
Cs	2.45	1.16	2.44	2.16	0.30	0.41	0.38	0.43	0.60	1.20	1.88
Ba	527	252	627	560	278	374	272	587	596	687	685
La	23.75	12.92	19.93	15.14	6.57	8.49	6.37	10.83	10.58	16.04	18.80
Ce	58.89	31.66	53.41	49.97	16.20	21.83	16.36	25.38	24.54	46.81	48.89
Pr	8.15	4.57	8.05	7.63	2.40	3.37	2.60	3.62	3.46	7.08	7.30
Nd	38.66	22.21	37.32	35.64	12.15	16.78	13.36	17.32	16.49	32.99	34.04
Sm	9.46	5.62	8.42	8.09	3.47	4.33	3.57	4.20	4.11	7.52	7.72
Eu	2.53	1.54	2.30	2.21	1.14	1.45	1.17	1.30	1.30	1.99	2.03
Gd	10.08	5.87	9.16	8.85	3.84	4.92	4.05	4.23	4.25	8.07	8.43
Tb	1.49	0.87	1.32	1.26	0.61	0.75	0.62	0.58	0.61	1.16	1.20
Dy	9.07	5.16	7.92	7.56	3.86	4.68	3.89	3.32	3.60	6.97	7.17
Ho	1.58	0.89	1.60	1.52	0.68	0.95	0.79	0.57	0.63	1.39	1.43
Er	4.97	2.76	4.60	4.36	2.12	2.70	2.22	1.77	1.97	3.95	4.08
Tm	0.84	0.46	0.65	0.61	0.36	0.38	0.31	0.29	0.33	0.55	0.57
Yb	5.15	2.77	4.31	4.07	2.18	2.53	2.06	1.78	2.03	3.62	3.75
Lu	0.80	0.43	0.65	0.61	0.33	0.38	0.31	0.27	0.31	0.55	0.57
Hf	7.58	4.15	6.36	6.03	2.20	2.90	2.17	2.29	2.61	6.21	6.14
Ta	0.51	0.31	0.36	0.33	0.13	0.22	0.06	0.12	0.17	0.37	0.28
Pb	7.71	3.45	7.07	6.28	2.83	3.10	2.34	3.75	4.41	7.92	8.31
Th	2.92	1.36	2.96	2.61	0.66	0.79	0.66	1.05	1.13	2.72	2.93
U	1.93	0.92	1.72	1.54	0.40	0.54	0.43	0.67	0.81	1.63	1.80

Примечание. Все микроэлементы определялись методом ICP-MS в Токийском технологическом институте (ТИТЕСН) и даны в ppm. ПТ – стратовулкан Плоский Толбачик; ОТ – стратовулкан Острый Толбачик. Полный набор данных может быть найден в работе [Churikova et al., 2015b], в том числе в электронном приложении к ней.

**Результаты К-Аг изотопного датирования пород пьедестала
Толбачинского вулканического массива и горы Поворотной**

Образец	Геологическое описание образца	K ₂ O, мас. %	⁴⁰ Ar _{рад} , 10 ⁻⁶ mISTP/г	Возраст (±1σ), млн лет	⁴⁰ Ar _{air} , %
TOL-13-03	Пьедестал Толбачинского массива, северная часть, авгитофир	1.320	0.0037	0.086±0.016	97.0
POV-10-05	Гора Поворотная, нижняя часть, авгитофир	1.450	0.0143	0.306±0.010	84.1

породы растворяли в тefлоновых стаканчиках в смеси кислот HF и HClO₄ под давлением, затем растворы выпаривали и остаток растворяли в кислоте HNO₃ для измерений. Международные стандарты JA-1, JB-2 и JB-3 измеряли вместе с образцами пород для проверки воспроизводимости результатов измерений. Оцененные ошибки измерений для Cs, Sr, Nd, Zr, Hf, Sm, Eu, Gd, Tb, Er, Cu, La, Ce составили около 10 %, для других элементов – около 20 %, измерения по Nb и Ta оказались полуколичественными.

Анализы изотопов Sr и Nd выполнялись в Отделении геохимии Земли Японского агентства морских и земных наук и технологий (D-SEG JAMSTEC). Методика, использованная для химического разделения изотопов и масс-спектрометрии для Sr и Nd изотопов, описана в работах [Hirahara et al., 2009; Takahashi et al., 2009; Miyazaki et al., 2012]. Бланковые значения для Sr и Nd в течение всего периода измерений были менее 177 и 5 пг соответственно. Отношения для изотопов Sr и Nd измеряли на термоионизационном масс-спектрометре TIMS Triton Thermo-Finnigan.

Изотопные отношения Sr и Nd были нормализованы к ⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.1194 и ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd = 0.7219 соответственно для коррекции масс-фракционирования. Среднее значение ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr в международном стандарте NIST 987 было 0.710220 (±0.000012; 2σ, n = 13), а среднее значение ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd в международном стандарте JNdi-1 – 0.512098 (±0.000013; 2σ, n = 15).

Возраст пород (табл. 4.3) К-Аг методом определяли в Институте геологии и геоинформатики, Япония (IGG AIST). Для подготовки образцов к анализу использовали кусочки из неизмененных, хорошо раскристаллизованных участков породы весом около 50 г. Образцы дробили до размера 250–500 мкм, затем промывали деионизованной водой в ультразвуковой ванне. Чтобы избежать избыточного ⁴⁰Ar, крупные фенокристаллы (размером >0.5 мм) удалялись магнитным сепаратором, тяжелыми жидкостями и вручную. Для анализа содержания калия в породе 3–5 г того же образца истирали в агатовой ступке.

Изотопные отношения для Ar определяли методом изотопного разбавления с использованием спайка ³⁸Ar. Извлечение Ar из образца проводили с использованием высоковакуумной линии экстракции из нержавеющей стали. Образцы весом 0.35–0.4 г обертывали в 10-микронную медную фольгу и расплавляли при нагреве до температуры 1500 °C при помощи электрического тока в танталовой печи двойного вакуума, которая перед каждым измерением дегазировалась при температуре 120 °C в течение 72 ч. Спайк ³⁸Ar поступал из контейнера через клапан-дозатор и смешивался с газом, выделяющимся из образца по мере его плавления. Очистка выделяющегося газа достигалась при помощи двух насосов и одного газопоглотителя. Изотопы Ar измеряли на масс-спектрометре VG Isotopes 1200C, оборудованном ионным источником

типа Niер и коллектором Фарадея. Стандарт анализировался один или два раза в день для коррекции масс-фракционирования.

Содержание калия определяли для 200 мг от каждого образца методом пламенной эмиссионной спектроскопии с использованием интегрирования пика и метода литиевого внутреннего стандарта [Matsumoto, 1989]. Ошибка в определении содержания калия в образцах оценивается в 0.5 % [Там же].

4.3. ПОЛУЧЕННЫЕ ДАННЫЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Петрография. По количественно-минеральному составу и макроструктурам породы Толбачинского массива разделяются на три группы, включающие восемь ассоциаций. Это ОI-содержащие (ОI-Срх-Pl, ОI-Pl, ОI-Срх и ОI-Орх-Pl), безоливиновые породы порфировой структуры (2Рх-Pl, Срх-Pl и Pl) и субафировые разности. Около 80 % пород массива являются ОI-содержащими. Породы характеризуются различными вариациями содержаний фенокристаллов, а по пористости варьируют от плотных до высокопористых.

Оливин-клинопироксен-плаггиоклазовые лавы широко распространены на Толбачинском вулканическом массиве. Они представлены на всех этапах вулканической деятельности: среди пород пьедестала, в постройках стратовулканов, в большинстве конусов и даек. Содержание вкрапленников темноцветных минералов в породе меняется от 5 до 20 %, а по соотношению минералов лавы варьируют от обогащенных ОI и Срх до существенно плаггиоклазовых. Все минералы фенокристаллов хорошо ограненные. Плаггиоклаз в большинстве случаев наиболее распространенный фенокристалл в ОI-Срх-Pl породах, он формирует сростки и двойники. Размер плаггиоклазовых зерен меняется от нескольких миллиметров до 2 см в мегаплаггиофировых лавах. Фенокристаллы Pl часто сильно резорбированы на краях и зональны в ядрах и средних частях. Клинопироксен также часто представлен сростками, иногда в совокупности с ОI. Оливин обычно желтого цвета, размером менее 3 мм, иногда содержит расплавные включения и вростки шпинели (Sp). Породы характеризуются порфировыми и серийно-порфировыми структурами, до мегаплаггиофировых в породах даек. Структуры основных масс гиалопилитовые, пилотакситовые или микродолеритовые. При этом в одном образце структура может меняться от витрофировой до существенно порфировой. Основная масса сложена теми же минералами с добавкой Mt, в зависимости от его количества цвет основной массы может меняться от светло-серого до черного.

Оливин-плаггиоклазовые породы также развиты во всех вулканических комплексах массива, за исключением пьедестала, и доминируют среди пород стратовулкана Острый Толбачик. Текстуры этих пород часто субафировые. Эта ассоциация характеризуется отсутствием фенокристаллов Срх, но иногда присутствуют его субфенокристаллы размером менее 0.5 мм. По количеству и размеру Pl всегда преобладает в этих породах над темноцветными минералами. Оливин обычно представлен зернами менее 2 мм и менее 1 мм в мегаплаггиофировых лавах. Структуры основных масс пилотакситовые или витрофировые, до криптофельзитовых в шлакоподобных разностях, реже структуры гиалопилитовые и интерсертальные.

Оливин-клинопироксеновые лавы распространены менее первых двух ассоциаций. Они встречаются в породах пьедестала, стратовулканов и даек. Среди пород моногенных конусов эта ассоциация наблюдалась только в высоко-Mg базальтах. Структуры этих пород меняются от субафировых до

порфириновых. Количество темноцветных минералов меняется от 1 до 15 %, а размер кристаллов-вкрапленников достигает 1 см. Оливин хорошо огранен, часто имеет включения Sr как дочерней фазы. Основная масса представлена витрофириновыми и гиалопилитовыми структурами. Вулканическое стекло бурое от большого количества Mt в основной массе.

Оливин-ортопироксен-плагиоклазовые породы редки в Толбачинском массиве и были встречены только в верхней части стратовулкана Острый Толбачик. Количество Pl в этих породах заметно превышает количество темноцветных минералов. Структуры основных масс гиалопилитовые.

Клинопироксен-плагиоклазовые лавы преобладают среди пород пьедестала, нижних частей обоих стратовулканов и даек, но не были обнаружены среди пород наложенной зоны шлаколавовых конусов и в верхних частях построек стратовулканов. В Сrx-Pl лавках Pl, как правило, вытянут, его кристаллы зональны и резорбированы, не превышают 2–3 мм в длину. Структуры основных масс гиалопилитовые, витрофириновые или микродолеритовые и могут быть в разной степени раскристаллизованы даже внутри одного образца. Соотношение Сrx и Pl может меняться: от существенно-Pl (см. ниже) до существенно-Сrx разностей, не содержащих Pl фенокристаллы. Существенно-Сrx лавы с высоким содержанием крупных фенокристаллов клинопироксена Б.И. Пийп назвал авгитофириновыми [Пийп, 1954]. Количество Сrx может достигать 30 %. Оливин редок, его размер не превышает 1 мм. Кристаллы Сrx размером до 8–10 мм часто зональны и могут быть окружены вулканическим стеклом. Клинопироксен-плагиоклазовые и особенно авгитофириновые разности обычны среди пород комплекса пьедестала и типичны для горы Поворотной.

Двупироксен-плагиоклазовые породы встречаются не часто. Так же, как и Сrx-Pl лавы, они отмечаются в комплексах пьедестала, стратовулканов и даек. Несмотря на высокие содержания Pl в этих породах, кристаллы Орх могут достигать больших размеров. Ортопироксен часто зонален, его количество достигает 20 %.

Существенно-плагиоклазовые лавы встречаются во всех вулканических комплексах Толбачинского массива, преобладают в верхних частях стратовулканов и среди пород моногенных конусов, где представлены преимущественно мегалпагиофириновыми разностями, в том числе среди пород извержения 2012–2013 гг. Иногда в незначительных количествах (<1 %) встречается Ol и редко Сrx. Кристаллы и сростки Pl имеют хорошую огранку и разные размеры, формируя серийно-порфириновые структуры. Структуры основных масс гиалопилитовые и витрофириновые.

Субафириновые породы встречаются среди всех выделенных петрографических разностей и во всех комплексах массива. Они характеризуются тонкокристаллической структурой, различной степенью раскристаллизованности основной массы и редкими фенокристаллами Ol, Сrx, и Pl. Основная масса также сложена Ol, Сrx, и Pl микролитами. Цвет неизмененного чистого вулканического стекла в этих породах меняется от белого до бурого. Структуры основных масс гиалопилитовые и витрофириновые.

Макроэлементы в породах. Все изученные породы Толбачинского вулканического массива относятся к умеренно- и высоко-К известково-щелочным базальт-андезибазальтовым сериям (см. табл. 4.1, рис. 4.4). Фигуративные точки на диаграммах Харкера (см. рис. 4.4) демонстрируют для всех главных элементов явное разделение данных на два разнонаправленных тренда и одну отдельную область. Причем в этой области оказываются образцы

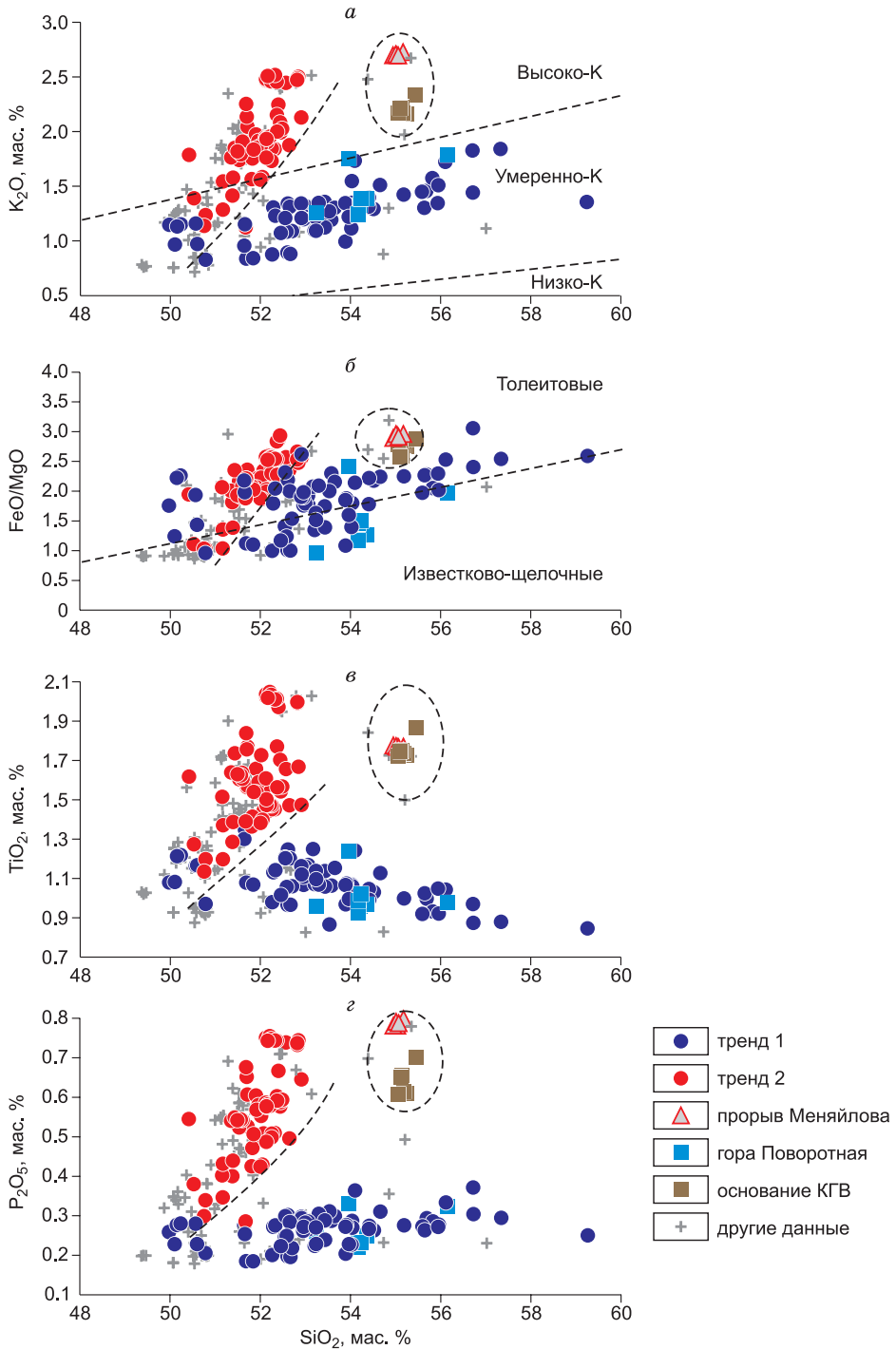


Рис. 4.4. Диаграммы Харкера для пород Толбачинского вулканического массива, горы Поворотной и основания КГВ.

a – классификационная диаграмма зависимости K₂O от SiO₂ по [Le Maitre et al., 2002]; *б* – классификационная диаграмма зависимости FeO/MgO от SiO₂ по [Miyashiro, 1974], *в*, *з* – зависимости TiO₂ и P₂O₅ от SiO₂, демонстрирующие разделение всех пород Толбачинского вулканического массива на два тренда. Для сравнения показаны также ранее опубликованные данные, взятые из других источников [Kersting, 1995; Tatsumi et al., 1995; Hochstaedter et al., 1996; Kerezhinskas et al., 1997; Turner et al., 1998; Pineau et al., 1999; Churikova et al., 2001; Bindeman et al., 2004; Portnyagin et al., 2007a; Bryant et al., 2011; Волынец и др., 2013]. Под FeO здесь и в тексте имеется ввиду пересчитанное на FeO суммарное содержание окислов железа

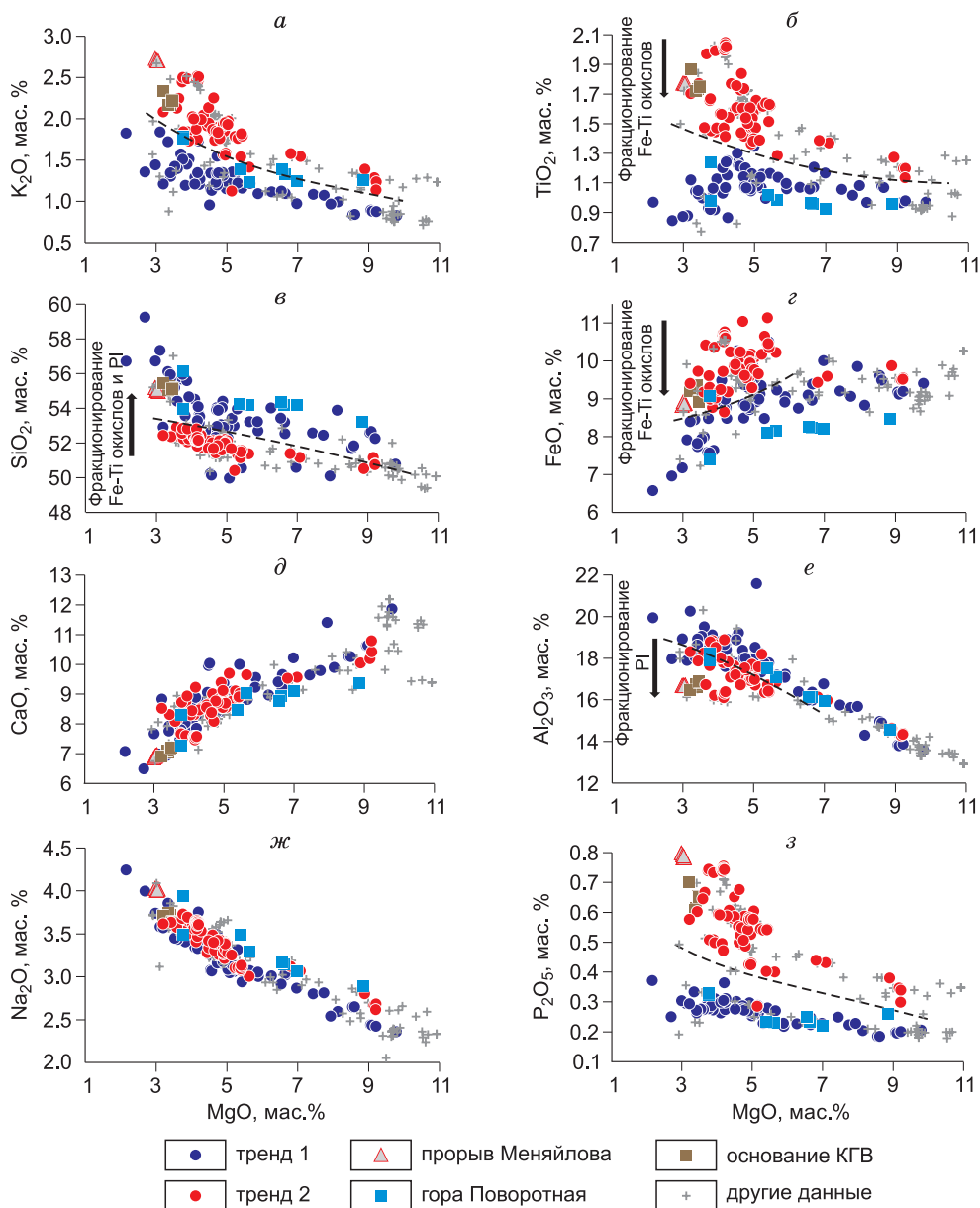


Рис. 4.5. Феннеровские диаграммы для пород Толбачинского вулканического массива, горы Поворотной и основания КГВ.

Видно, что образцы прорыва Меньяйлова извержения 2012–2013 гг. относятся к тренду 2. Стрелками показано изменение состава пород при фракционировании Fe-Ti-оксидов и плагиоклаза

только первых трех дней извержения 2012 г. – образцы из прорыва Меньяйлова и высоко-К базальты основания КГВ. Однако на феннеровских диаграммах отчетливо видно, что точки, представляющие прорыв Меньяйлова, относятся к одному из двух упомянутых трендов. Первый тренд (тренд 1 на рис. 4.4) представлен умеренно-К базальт-андезибазальтовым рядом. Этот тренд занимает пограничное положение между толеитовой и известково-щелочной сериями на диаграмме Миаширо с уклоном к толеитам в андезибазальтах (см. рис. 4.4, б). В рамках этого тренда при эволюции от базальтов к андезибазаль-

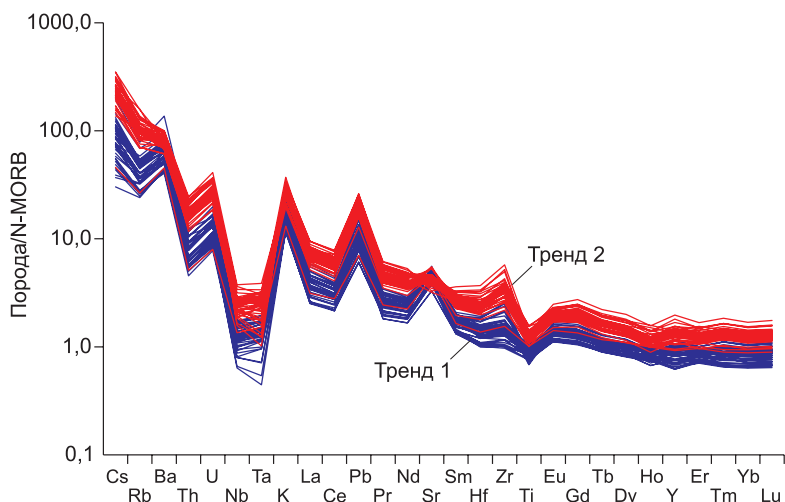


Рис. 4.6. Нормированные к N-MORB кривые распределений микроэлементов в породах Толбачинского вулканического массива и горы Поворотной.

Дополнительные данные для прорыва Меняйлова извержения 2012–2013 гг. взяты из работы [Вольнец и др., 2013]. Порядок несовместимых элементов – из работы [Hofmann, 1988] с добавлением Cs и всех REE. Содержания микроэлементов в N-MORB взяты из [Sun, McDonough, 1989]

там наблюдается устойчивое возрастание K_2O , Na_2O и P_2O_5 при уменьшении значений Al_2O_3 , TiO_2 , CaO , FeO и MgO . Лавы горы Поворотной также попадают в этот тренд.

Второй тренд (тренд 2 на рис. 4.4) – умеренно-высоко-К, толеитовый и полностью соответствует большинству пород Толбачинских шлаколавовых конусов. Лавы прорыва Меняйлова также относятся к этому тренду. Тренд 2 обогащен по калию, титану, железу и фосфору и обеднен по кремнию и алюминию по сравнению с трендом 1 (см. рис. 4.4, 4.5). На рис. 4.5 тренды 1 и 2 хорошо различаются (отделены штриховой линией, кроме рис. 4.5, д, ж). Внутри этого тренда при увеличении SiO_2 всего на 2,5 % наблюдается резкое возрастание щелочей, P_2O_5 и TiO_2 при резком снижении MgO , MnO , FeO и CaO .

Микроэлементы в породах. Распределение микроэлементов во всех породах Толбачинского массива имеет типичные островодужные признаки со значительным обогащением крупноионными литофильными элементами (LILE) и легкими редкоземельными элементами (REE), и обеднением по высокозарядным элементам (HFSE), что свидетельствует о добавке субдукционного флюида в мантийный источник пород (рис. 4.6). Несмотря на внешнее сходство кривых распределения микроэлементов на спайдер-диаграммах для всех исследованных образцов, между двумя трендами наблюдаются определенные различия. Породы, относящиеся к тренду 1, систематически обеднены по Nb, Ta, REE по сравнению с N-MORB, в то время как породы тренда 2 систематически обогащены этими элементами, а на диаграммах микроэлементов и их отношений (рис. 4.7) фигуративные точки пород из двух трендов занимают различные области (см. рис. 4.6 и 4.7).

Высокомагнезиальные базальты Северного прорыва БТТИ, исследованные ранее [Чурикова и др., 2001; Churikova et al., 2001], показывают наименьшие значения всех несовместимых элементов в Толбачинском массиве, распределение микроэлементов в них соответствует таковому в породах тренда 1.

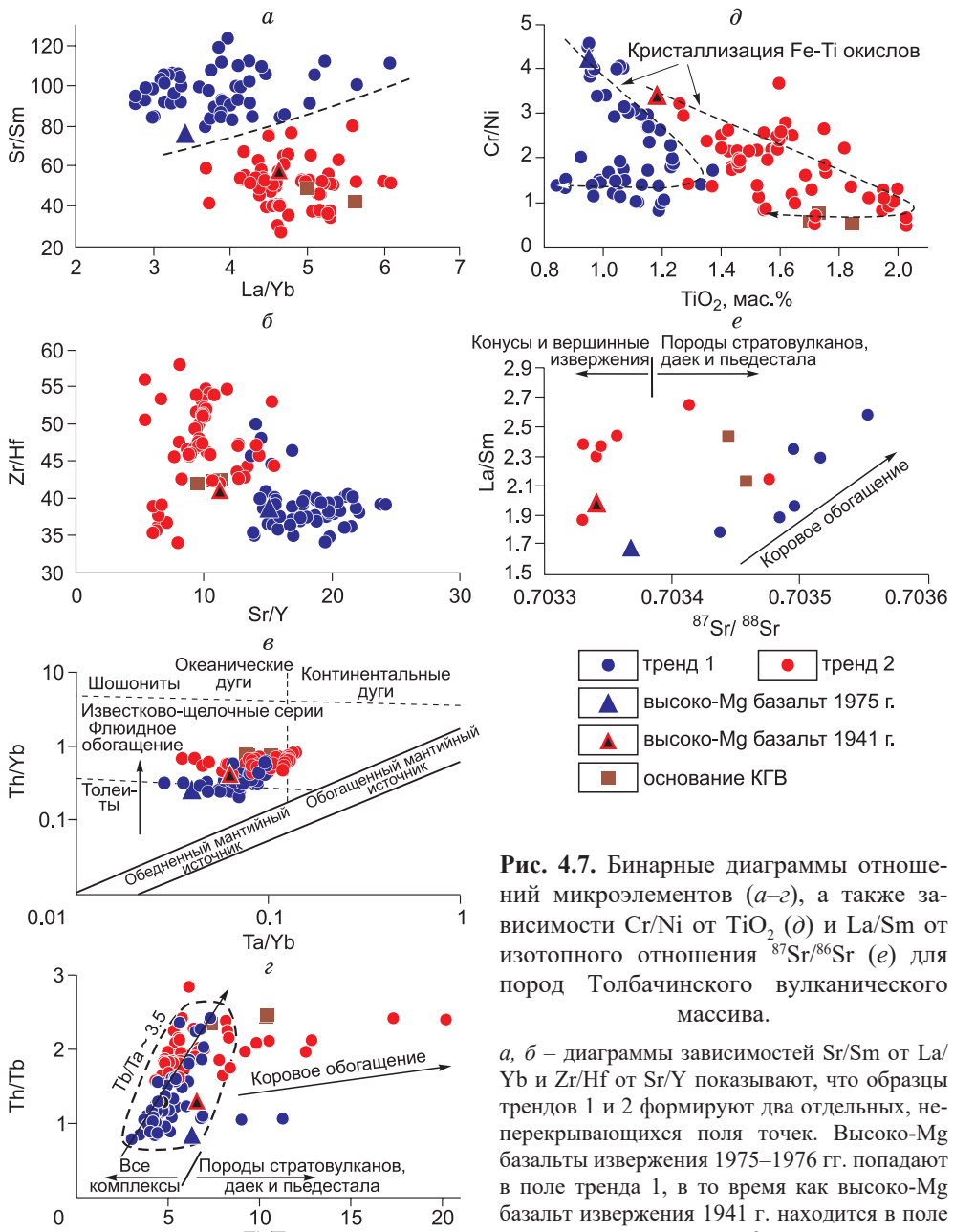


Рис. 4.7. Бинарные диаграммы отношений микроэлементов (а–г), а также зависимости Cr/Ni от TiO₂ (д) и La/Sm от изотопного отношения ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr (е) для пород Толбачинского вулканического массива.

а, б – диаграммы зависимостей Sr/Sm от La/Yb и Zr/Hf от Sr/Y показывают, что образцы трендов 1 и 2 формируют два отдельных, неперекрывающихся поля точек. Высоко-Mg базальты извержения 1975–1976 гг. попадают в поле тренда 1, в то время как высоко-Mg базальт извержения 1941 г. находится в поле тренда 2.

в – диаграмма для Th/Yb в зависимости от Ta/Yb по [Pearce, 1983]. Практически все образцы Толбачинского вулканического массива попадают в поле океанических дуг, сформированных из обедненных мантийных источников.

г – бимодальная диаграмма изменения отношений Th/Tb и Th/Ta показывает, что все изученные породы формировались из единого или близких мантийных источников с отношением (Th/Yb)/(Th/Ta) около 3.5 до момента обогащения их субдукционным компонентом. Породы периодов 1–3 формирования массива обогащены по Th/Ta благодаря процессу ассимиляции корового вещества.

д – диаграмма зависимости Cr/Ni от TiO₂ подчеркивает более позднюю кристаллизацию Fe-Ti-оксидов в магмах тренда 2 в сравнении с расплавами тренда 1.

е – положительная корреляция отношений La/Sm и ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, наблюдаемая в породах периодов 1–3 подтверждает процесс ассимиляции корового вещества магмами массива. Породы конусов обнаруживают значительный разброс по отношению La/Sm при относительно идентичных изотопных характеристиках Sr

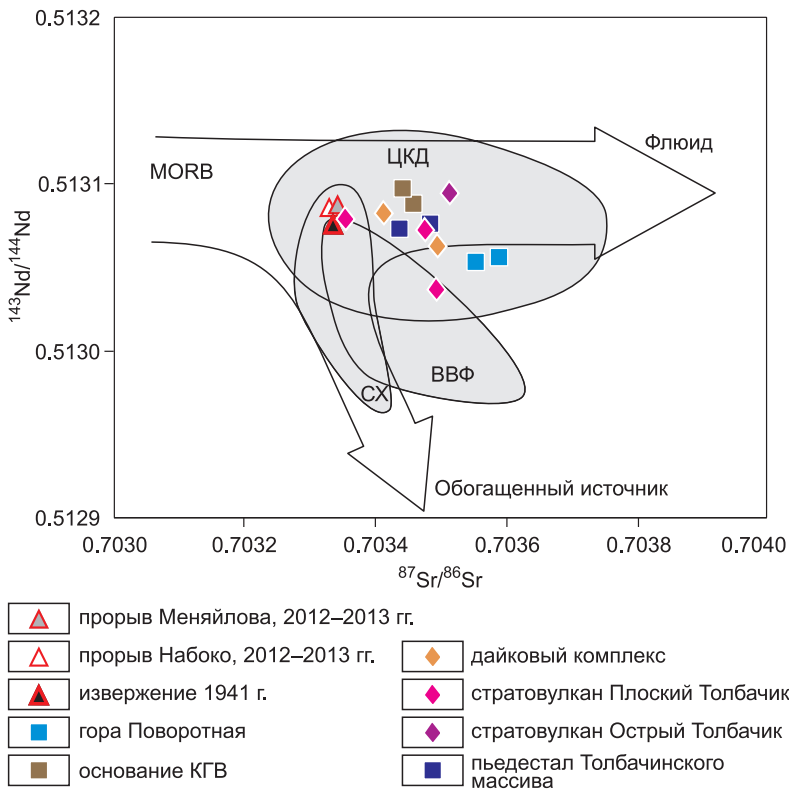


Рис. 4.8. Зависимость отношения изотопов $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ от $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для пород Толбачинского вулканического массива, горы Поворотной и основания КГВ.

ВВФ – Восточный вулканический фронт; ЦКД – Центральная Камчатская депрессия; СХ – Срединный хребет. Данные для построения поля ЦКД взяты из работ [Kersting, 1995; Turner et al., 1998, 2007; Churikova et al., 2001; Dosseto et al., 2003; Bindeman et al., 2004, 2005; Portnyagin et al., 2007a; Almeev et al., 2013b], данные для ВВФ и СХ из работы [Churikova et al., 2001]

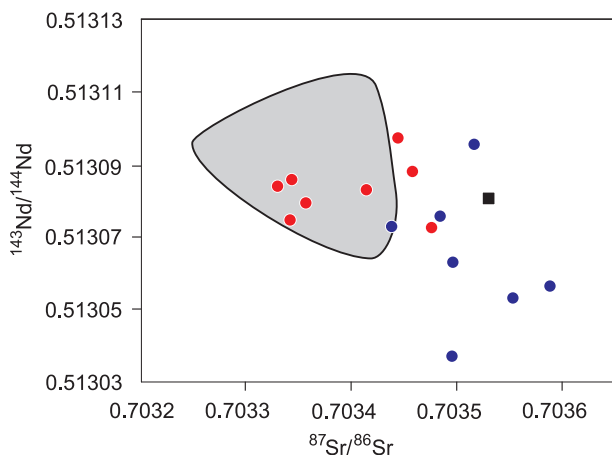
Распределение микроэлементов в лавах горы Поворотной также соответствует породам тренда 1.

Породы прорыва Меняйлова наиболее обогащены по всем несовместимым элементам не только среди пород Толбачинского массива, но и в сравнении со всеми породами КГВ. Высоко-К породы Южного прорыва БТТИ и высоко-Mg базальты извержения 1941 г. также имеют обогащенный спектр распределения редких элементов, как и в породах тренда 2.

Изотопные данные. Изотопные данные для пород Толбачинского вулканического массива и соседних с ним вулканических образований расположены в пределах полей N-MORB и ЦКД (рис. 4.8 и 4.9, табл. 4.4). В отличие от ранее опубликованных данных для Толбачинского вулканического массива [Kersting, Arculus, 1995; Tatsumi et al., 1995; Kepezhinskas et al., 1997; Turner et al., 1998; Волынец и др., 2000; Чурикова и др., 2001; Churikova et al., 2001; Dosseto et al., 2003; Bindeman et al., 2004; Portnyagin et al., 2007a], часть наших данных показывает обогащение по отношению $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и обеднение по отношению $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (см. рис. 4.9).

Наблюдаются некоторые различия в распределении изотопных соотношений в породах разных стратиграфических комплексов Толбачинского вулканического массива. Образцы базальтов из шлаковых конусов и лавовых

Рис. 4.9. Зависимость отношения изотопов $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ от $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ для образцов тренда 1 и тренда 2. Дополнительно использованы данные из работ [Kersting, Arculus, 1995; Tatsumi et al., 1995; Кеpezhinskas et al., 1997; Churikova et al., 2001; Dosseto et al., 2003; Bindeman et al., 2004; Portnyagin et al., 2007a]



● тренд 1 ■ стратовулкан Плоский Толбачик [Dosseto et al., 2003]
● тренд 2 ◐ другие опубликованные данные

потоков верхней части Плоского Толбачика показывают уменьшение отношения изотопов Sr и увеличение отношения изотопов Nd.

Породы пьедестала, стратовулканов и даек имеют повышенные отношения изотопов Sr и несколько уменьшенные отношения изотопов Nd. Образцы горы Поворотной характеризуются наибольшими значениями $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и наименьшими значениями $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (см. рис. 4.8). Лавы основания КГВ практически идентичны по Sr-Nd систематике породам пьедестала, стратовулканов и даек.

Таблица 4.4

Изотопные отношения Sr и Nd для представительных пород Толбачинского вулканического массива, горы Поворотной и основания КГВ

Образец	Описание образца	Тренд	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\sigma$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$
Пьедестал Толбачинского массива						
TOL-13-07	Северный сектор	1	0.703438	± 6	0.513073	± 8
TOL-12-33	Юго-западный сектор	1	0.703484	± 7	0.513076	± 10
Стратовулкан Плоский Толбачик						
TOL-12-15	Прикратерный конус	2	0.703357	± 6	0.513080	± 9
TOL-12-38	Юго-восточный сектор	2	0.703476	± 7	0.513073	± 9
TOL-12-53	Восточный сектор	1	0.703495	± 7	0.513037	± 9
Стратовулкан Острый Толбачик						
TOL-13-24	Северный сектор	1	0.703516	± 8	0.513096	± 8
Дайковый комплекс						
TOL-12-50	Дайка Плоского Толбачика	2	0.703414	± 6	0.513083	± 8
TOL-13-34	Дайка Острого Толбачика	1	0.703496	± 7	0.513063	± 8
Моногенные конусы						
TOL-12-29	Извержение 1941 г.	2	0.703341	± 6	0.513075	± 4
TOL-13-56	Прорыв Меняйлова 2012 г.	2	0.703344	± 6	0.513086	± 7
TOL-13-59	Прорыв Набоко 2012–2013 гг.	2	0.703330	± 6	0.513084	± 6
Гора Поворотная						
POV-10-03	Нижняя пачка	1	0.703553	± 7	0.513053	± 7
POV-10-04	Верхняя пачка	1	0.703589	± 7	0.513056	± 7
Основание КГВ						
PLAT-13-03	Верхний поток		0.703458	± 7	0.513088	± 7
PLAT-13-06	Нижний поток		0.703444	± 6	0.513097	± 9

К-Аг датирование. К-Аг датирование проводилось для двух образцов, один из которых относился к пьедесталу Толбачинского массива (TOL-13-03), а другой – к горе Поворотной (POV-10-05). Оба образца являлись авгитофировыми андезибазальтами с крупными (до 2 см) фенокристаллами Сrx. Выбирались неизменные породы из стратиграфически нижних частей пьедестала и горы Поворотной. Возраст образца пьедестала составил 86 ± 16 тыс. лет, возраст нижней части горы Поворотной оказался 306 ± 10 тыс. лет (см. рис. 4.3, а, табл. 4.3).

4.4. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Геохимическая эволюция. Фигуративные точки пород пьедестала Толбачинского вулканического массива формируют тренд 1 (рис. 4.10, а, б) и показывают значительные вариации содержаний главных элементов, мас. %: SiO_2 – 51–56, Al_2O_3 – 13–19, MgO – 3–9, в то время как щелочи и фосфор меняются в относительно узких диапазонах: Na_2O – 2.4–3.7, K_2O – 0.9–1.4, P_2O_5 – 0.2–0.3, а Mg\# изменяется в пределах 43–64. На спайдер-диаграммах кривые распределения редких элементов во всех породах пьедестала субпараллельны, некоторое обогащение по микроэлементам наблюдается при изменении состава пород от базальтов до андезибазальтов, ясно указывая на фракционную кристаллизацию (рис. 4.11, а). Лавы этого комплекса являются самыми обедненными по тяжелым редкоземельным элементам (HREE) в массиве с фактором обеднения (полученным по отношению содержаний HREE в N-MORB и в изучаемых образцах) около 1/1.6.

Образцы пород стратовулкана Острый Толбачик распределены по обоим трендам (см. рис. 4.10, в, г). Фигуративные точки пород нижней части стратовулкана, вплоть до абсолютной высоты 2000 м, и нескольких образцов из его более верхних слоев ложатся на тренд 1, в то время как большинство составов образцов верхней части стратовулкана относится к тренду 2. Распределения микроэлементов на спайдер-диаграмме (см. рис. 4.11, б) в образцах, относящихся к разным трендам, заметно различаются. Распределение микроэлементов в породах из тренда 1 имеет хорошо выраженную положительную стронциевую аномалию и отношение $\text{Rb}_n / \text{Ba}_n < 1$ (здесь и далее n – содержание микроэлементов, нормированное к N-MORB), в то время как для пород тренда 2 положительная аномалия едва заметна, а отношение $\text{Rb}_n / \text{Ba}_n > 1$. Поскольку коэффициенты распределения между силикатным расплавом и плагиоклазом уменьшаются в порядке $\text{Sr} > \text{Ba} > \text{Rb}$ [Geochemical..., 2017], наблюдаемые различия между трендами, выраженные в стронциевой аномалии и в отношении $\text{Rb}_n / \text{Ba}_n$, могут указывать на доминирующую кристаллизацию плагиоклаза в случае тренда 2. Более того, концентрации микроэлементов в породах тренда 2 в два раза выше по всем несовместимым элементам по сравнению с породами, относящимися к тренду 1 (см. рис. 4.11, б). В то время как фактор обеднения для пород из тренда 1 меняется от 1/1.4 до 1/1.15, для пород из тренда 2 фактор обеднения лежит в пределах 1/0.8–1/0.7.

Стратовулкан Плоский Толбачик также состоит из пород, которые распределяются между двумя трендами (см. рис. 4.10, д, е и 4.11, в). Аналогично образцам Острого Толбачика, лавы из нижних частей Плоского Толбачика попадают на тренд 1, а лавы из верхней части стратовулкана попадают на оба тренда, но здесь проявления высоко-К пород были обнаружены уже на отметке 1400 м. Поведение микроэлементов в образцах стратовулкана Плоский Толбачик аналогично тому, что описано выше для Острого Толбачика.

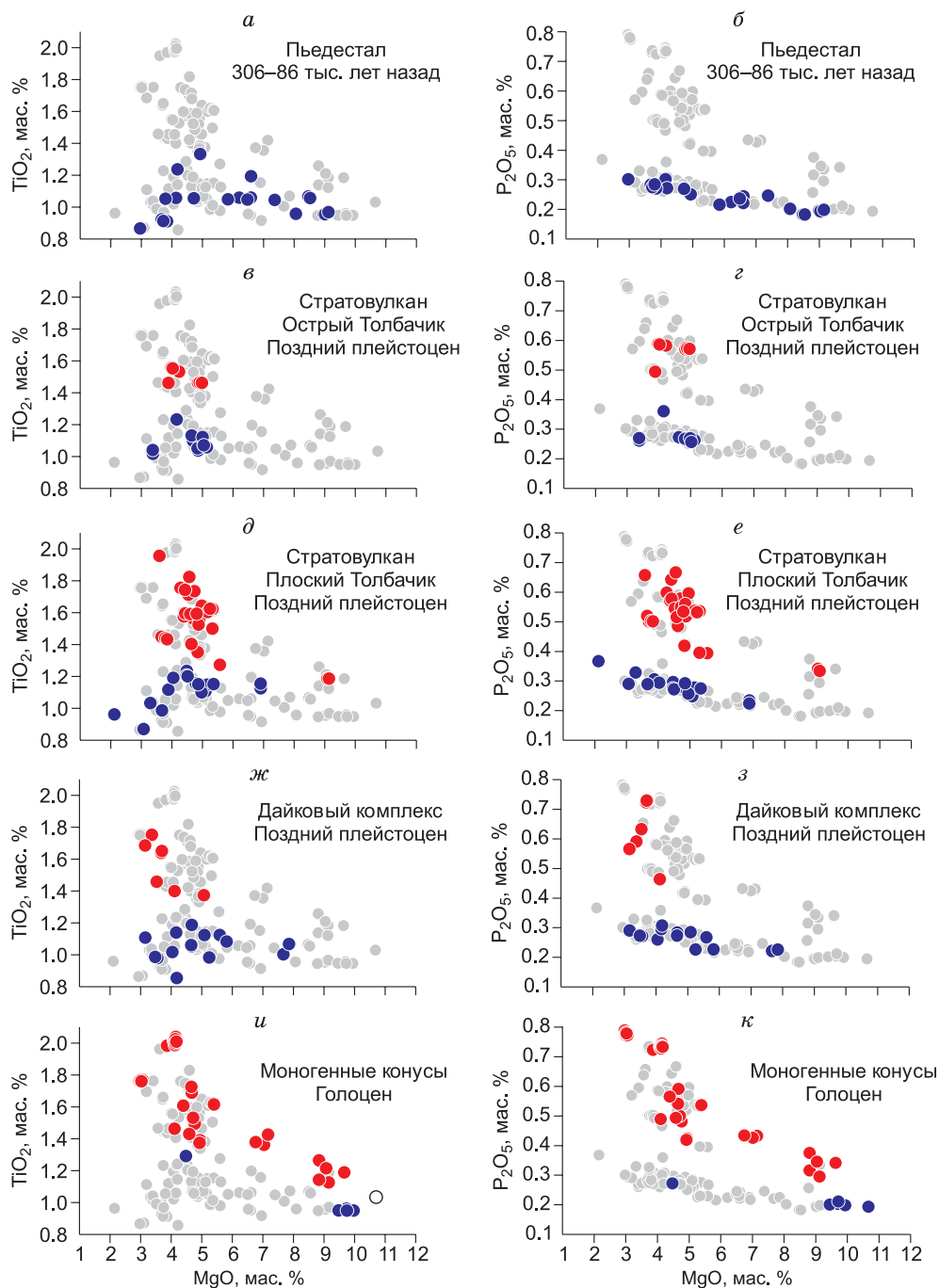


Рис. 4.10. Зависимость содержаний TiO_2 и P_2O_5 от MgO в различных комплексах Толбачинского массива.

а, б – пьедестал; *в, г* – стратовулкан Плоский Толбачик; *д, е* – стратовулкан Острый Толбачик; *ж, з* – дайки; *и, к* – моногенные конусы. Возраст каждого комплекса указан на диаграммах. Синими кружками показаны породы тренда 1, красными – породы тренда 2, серыми – все изученные породы

Как по макро-, так и по микроэлементам породы дайкового комплекса распределяются на графиках аналогично с породами стратовулканов (см. рис. 4.10, *ж, з*, 4.11, *г*), что предполагает их генетическую взаимосвязь и общ-

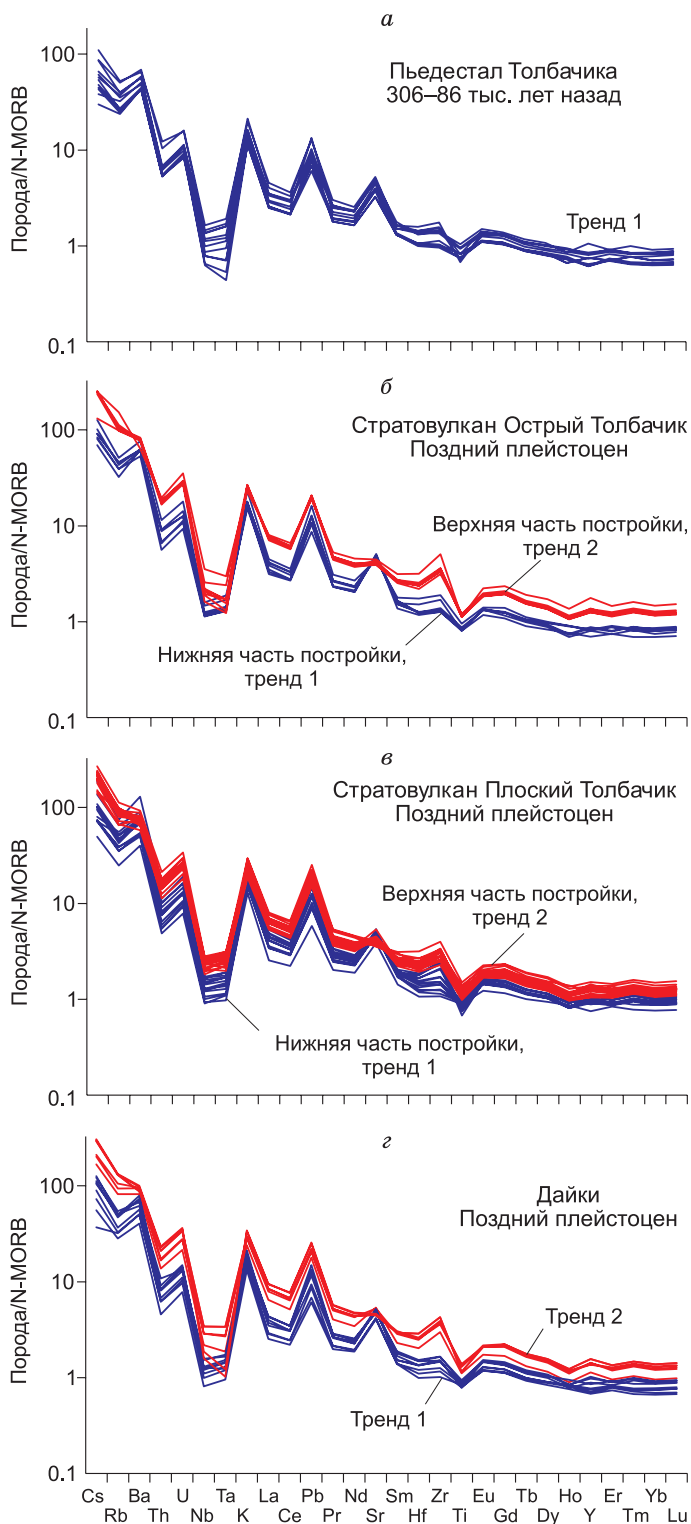


Рис. 4.11 (начало).

ность родительских расплавов, поскольку дайки могли являться подводящими каналами для лав стратовулканов.

Большинство моногенных конусов Толбачинского вулканического массива, включая конус извержения 1941 г., Южный прорыв БТТИ, извержение

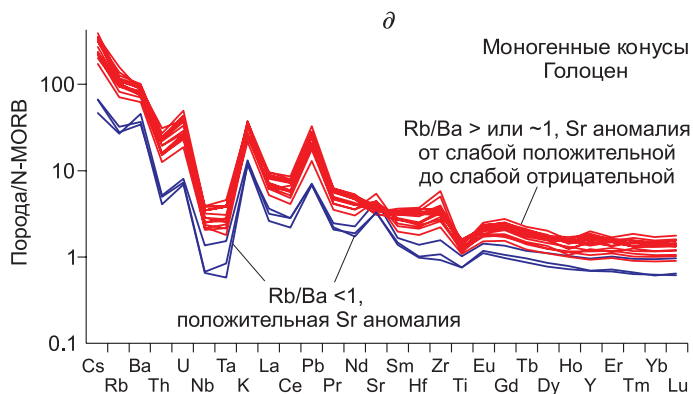


Рис. 4.11 (окончание). Распределение микроэлементов в различных комплексах Толбачинского массива.

a – пьедестал; *б* – стратовулкан Плоский Толбачик; *в* – стратовулкан Острый Толбачик; *г* – дайки; *δ* – моногенные конусы. Порядок несовместимых элементов взят из работы [Hofmann, 1988] с добавлением Cs и всех REE. Содержания микроэлементов в N-MORB взяты из [Sun, McDonough, 1989]. Дополнительные данные по моногенным конусам взяты из [Churikova et al., 2001; Bryant et al., 2011; Волюнец и др., 2013]

2012–2013 гг., по составам макро- и микроэлементов являются частью тренда 2 (см. рис. 4.10 *и, к, 4.11, δ*). Лавы этих объектов характеризуются слабой положительной или даже отрицательной аномалией Sr и отношением Rb_n/Ba_n , близким или большим единицы. Породы, аналогичные по составу макроэлементов лавам извержения 2012–2013 гг., никогда ранее не встречались на Толбачинском вулканическом массиве. Если же говорить о составе микроэлементов, то лавы, подобные породам извержения 2012–2013 гг., извергались на некоторых конусах в юго-западном секторе Толбачинского массива (образцы TOL-12-30 и TOL-12-31, см. табл. 4.2).

Образцы пород прорыва Меняйлова, являющиеся крайним членом эволюционного ряда, на некоторых диаграммах главных элементов выделяются на фоне других пород тренда 2 (см. рис. 4.4, 4.5). Отличие заключается в том, что при наивысшем среди всех пород тренда 2 содержании кремнезема наблюдаются относительно низкие содержания Al_2O_3 , FeO и TiO_2 (показано стрелками на рис. 4.5). Эти отличия могут объясняться одновременной кристаллизацией Fe-Ti оксидов и плагиоклаза. Изменение содержания TiO_2 в породах тренда 1 указывает, что насыщение Fe-Ti-оксидами возникло в магме, содержащей около 4.5 % MgO, в то время как в породах тренда 2 кристаллизация Fe-Ti-оксидов началась при 3.5 % MgO. Это отличие также наблюдается на графике Sr/Ni в зависимости от содержания TiO_2 (см. рис. 4.7, *δ*). Фракционирование Fe-Ti-оксидов в породах тренда 1 начинается при отношении Sr/Ni в расплаве около 2, в то время как в породах тренда 2 – только при Sr/Ni = 0.5.

На диаграммах Харкера и Феннера фигуративные точки наиболее основных по составу пород моногенных конусов Толбачинского вулканического массива, а именно: высоко-Mg базальты Северного прорыва БТТИ (образцы 655, TOL-96-02/1, TOL-96-02/2 из работы [Churikova et al., 2001]; TOL-13-82 из табл. 4.1) и конус Красный (образец TOL-96-04b [Churikova et al., 2001]), а также умеренно-K лавы Безымянного конуса к северу от Плоского Толбачика (образец TOL-13-43 из табл. 4.1), лежат в области пересечения двух трендов и по составу макроэлементов могут быть отнесены к любому из них (см. рис.

4.4, 4.5). Однако по составу микроэлементов эти лавы следует отнести к тренду 1 (см. рис. 4.11, д). Породы этих моногенных конусов обеднены HREE и характеризуются ярко выраженной отрицательной Nb-Ta аномалией по сравнению с породами тренда 2. Спайдер-диаграммы микроэлементов для этих конусов очень похожи на спайдер-диаграммы пород пьедестала: ярко выраженные стронциевые аномалии и отношения $Rb_n / Ba_n < 1$.

Таким образом, к тренду 1 относятся умеренно-K породы всего пьедестала, нижних и частично верхних частей стратовулканов, некоторых даек и некоторых конусов высоко-Mg пород, включая лавы Северного прорыва БТТИ. Породы тренда 1 обеднены HREE относительно N-MORB и имеют отношение $Rb_n / Ba_n < 1$. Тренд 1 подчинен процессам фракционной кристаллизации и типичен для островодужной обстановки, в том числе характерен для вулканов Ключевской группы [Churikova et al., 2001, 2013; Чурикова и др., 2012].

К тренду 2 относятся породы верхних частей стратовулканов, некоторых даек и большинства моногенных шлаколавовых конусов, включая извержение 1941 г., Южный прорыв БТТИ и извержение 2012–2013 гг. Породы тренда обогащены LILE, HFSE и REE элементами относительно N-MORB и имеют $Rb_n / Ba_n > 1$. Тренд 2 имеет необычно крутой наклон на диаграмме K_2O-SiO_2 (см. рис. 4.4, а), показывает явные толеитовые признаки (см. рис. 4.4, б) и не типичен для КГВ.

В предыдущих публикациях возникновение двух типов пород объяснялось либо добавкой различного количества флюида, отделяющегося от погружающейся плиты [Churikova et al., 2001], либо существованием двух мантийных источников: высоко-Mg для Северного прорыва БТТИ и высокоглиноземистого – для Южного прорыва [Флеров и др., 1984].

Фракционная кристаллизация. Систематические различия между двумя трендами как по макро- (см. рис. 4.4, 4.5 и 4.10), так и по микроэлементам (см. рис. 4.6, 4.11) предполагают различные процессы формирования пород и/или их происхождение из различных источников. Мы считаем, что главным процессом, отвечающим за формирование пород внутри трендов, является фракционная кристаллизация, но в различных условиях. В качестве возможных условий кристаллизации Толбачинских пород мы использовали опубликованные результаты, основанные как на изучении их минерального состава, так и на результатах экспериментов по их плавлению [Луканин и др., 1980; Романчев, Флеров, 1980; Флеров и др., 1980; Флеров и др., 2015; Churikova et al., 2015a, табл. 3].

Родительские расплавы. В качестве начальных расплавов при моделировании фракционной кристаллизации априори нами были приняты высоко-Mg базальты Северного прорыва БТТИ – образец 655, предоставленный Г.Б. Флеровым, и извержения 1941 г. – образец 201. Оба образца были проанализированы на макро- и микроэлементы [Churikova et al., 2001]. Образцы сходны по содержаниям макроэлементов и близки по магнизиальному номеру пород (65.5 для образца 655 и 64 для образца 201), но спайдер-диаграммы для этих образцов показывают заметные различия в распределении микроэлементов (рис. 4.12). Распределение микроэлементов в образце 655 аналогично распределению микроэлементов в породах тренда 1 с ярко выраженной стронциевой аномалией и отношением $Rb_n / Ba_n < 1$. В то же время распределение микроэлементов в образце 201 отвечает распределению микроэлементов в породах тренда 2 со слабой положительной стронциевой аномалией и отношением $Rb_n / Ba_n > 1$. В дополнение к этим различиям заметим, что в образце 201 со-

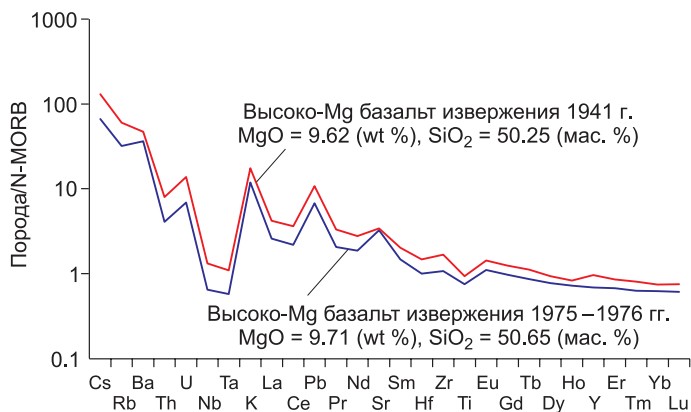


Рис. 4.12. Распределение микроэлементов в высоко-Mg лавах извержений 1975–1976 и 1941 гг., нормализованные к N-MORB

держание калия, фосфора и титана, а также всех несовместимых микроэлементов в два раза выше относительно образца 655.

Можно было бы предположить, что уменьшение бария и стронция в образце обусловлено фракционированием плагиоклаза в процессе кристаллизации, так как коэффициенты распределения плагиоклаз–расплав выше для Sr и Ba по сравнению с Rb [Bindeman, Davis, 2000]. Однако ни в образце 655, ни в образце 201 нет фенокристаллов Pl. Поэтому различия в составе микроэлементов в этих породах затруднительно объяснить кристаллизацией плагиоклаза. Также невозможно объяснить двукратное различие содержания всех несовместимых микроэлементов между двумя высокомагнезиальными базальтами просто за счет фракционной кристаллизации одного расплава.

Это различие в составе микроэлементов может быть обусловлено следующими причинами: существованием двух различных мантийных источников; различными условиями плавления в одном мантийном источнике; различной степенью обеднения одного мантийного источника ввиду многократных предыдущих мантийных выплавов.

В работе [Churikova et al., 2001] показано, что степени плавления умеренно-K и высоко-K пород КГВ могут быть аналогичными и что высоко-K лавы обогащены подвижными с флюидом элементами по сравнению с умеренно-K, что подтверждается увеличением отношения Th/Yb в лавах пород тренда 2 по сравнению с породами тренда 1 (см. рис. 4.7, в). Дополнительная добавка флюида могла бы понизить температуру плавления в области источника и увеличить степень плавления для образцов тренда 2 с последующим обеднением по микроэлементам по сравнению с трендом 1. Однако в породах тренда 2 наблюдается прямо противоположная корреляция калия и микроэлементов. Следовательно, различные условия плавления в одном источнике не могут объяснить формирование двух трендов пород Толбачинского вулканического массива.

Субпараллельные распределения микроэлементов на спайдер-диаграммах (см. рис. 4.6, 4.12) и близкие изотопные характеристики (см. рис. 4.8, 4.9) предполагают, что породы обоих трендов могли произойти от единого источника. Используя подход [Saunders et al., 1988], мы проверили распределения трех высоконесовместимых элементов, имеющих идентичные коэффициенты распределения, – Th, Tb, Ta (см. рис. 4.7, з). Образцы моногенных конусов

и большинства пород других комплексов показывают приблизительно одно и то же соотношение $(Th/Ta)/(Th/Tb)$, составляющее около 3,5, что предполагает наличие одного мантийного источника для пород Толбачинского вулканического массива. Обогащение Th в результате добавки субдукционного флюида или расплава не влияет на отношение $(Th/Ta)/(Th/Tb)$ в этих породах. Некоторое увеличение отношения Th/Ta наблюдается для пьедестала, стратовулканов и даек, что можно объяснить добавкой корового вещества на этапах формирования этих комплексов. На диаграмме Th/Yb в зависимости от Ta/Yb все образцы Толбачинского массива также располагаются в едином поле в пределах обедненного мантийного источника (см. рис. 4.7, в). Некоторые образцы тренда 2 занимают промежуточное положение между океаническими и континентальными дугами. Все это свидетельствует о том, что магмы тренда 1 и 2 генерировались в едином мантийном источнике, но в областях с различной степенью обеднения по микроэлементам.

Многие дискриминационные диаграммы для редких элементов показывают, что образцы тренда 1 попадают в поле вулканических дуг, в то время как образцы тренда 2 обнаруживают рифтогенные признаки (например, рис. 4.13). Мы предполагаем, что при формировании пьедестала, стратовулканов и даек действовал мантийный источник, производящий лавы тренда 1 (по составу близкий образцу 655). После образования в позднем плейстоцене–голоцене разломной зоны, глубинные, обогащенные микроэлементами расплавы того же мантийного источника начали подниматься и формировать на поверхности породы тренда 2 (например, образец 201).

Диаграммы отношений микроэлементов (см. рис. 4.7, а, б) показывают ясное разделение пород на две группы, соответствующие двум трендам, при этом высоко-Mg базальт Северного прорыва БТТИ близок к породам тренда 1, в то время как лава извержения 1941 г. близка образцам тренда 2. Поэтому мы использовали состав образца 655 как родительский расплав для мо-

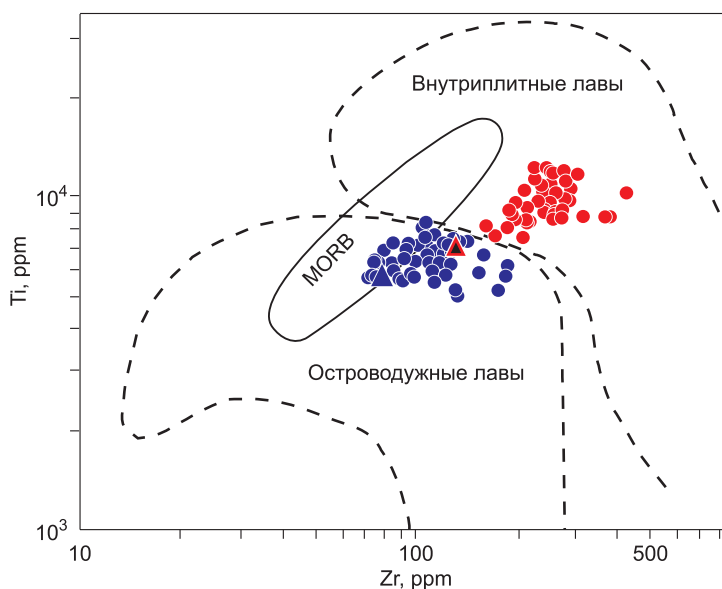


Рис. 4.13. Дискриминационная диаграмма зависимости Ti от Zr, показывающая поля MORB и внутриплитных базальтов по [Pearce, 1982].

Усл. обозн. см. на рис. 4.7

делирования пород тренда 1, а состав образца 201 – как родительский расплав для моделирования пород тренда 2. Поскольку высокомагнезиальный базальт Северного прорыва БТТИ на диаграммах макроэлементов лежит в области пересечения двух трендов (см. рис. 4.4, 4.5), потенциально он может являться родительским расплавом для пород обоих трендов при различных P – T – H_2O – fO_2 условиях.

Численное моделирование. Для численного моделирования процессов фракционной кристаллизации использовалась программа COMAGMAT 3.57 [Ariskin, 1999].

Давление кристаллизации, оцененное для пород стратовулкана по равновесию $O1$ – Srx –расплав, составляет 2–3 кбар при 2–3 % H_2O [Флеров и др., 2015]. Для моделирования фракционной кристаллизации проводилась серия расчетов со следующими параметрами: начальный состав расплава совпадал с составом образца 655, фугитивность кислорода соответствовала буферу NNO , начальное содержание воды менялось в расчетах от 2 до 3 %, давление – от 2 до 3 кбар (также использовалась декомпрессия до 0 кбар). Расчет при содержании воды 3 % и постоянном давлении 2 кбар дает составы пород, лежащие близко к наблюдаемому тренду 1 (рис. 4.14).

Эксперименты с высоко- Mg базальтами Северного прорыва БТТИ показали, что породы могли кристаллизоваться в безводных условиях с давлением, меняющимся от 4–7 кбар до 1 кбар [Луканин и др., 1980; Романчев, Флеров, 1980; Флеров и др., 1980]. Принимая составы образцов 201 и 655 в качестве родительских расплавов, мы провели серию расчетов со следующими параметрами: содержание воды 0 и 0.5 %, фугитивность кислорода соответствовала NNO -, QFM - и IW -буферам, давление от 1 до 7 кбар, в том числе с декомпрессией, расчеты проводились в рамках как фракционной, так и равновесной кристаллизации. Численное моделирование позволило воспроизвести тренд 2 при следующих параметрах фракционной кристаллизации: фугитивность кислорода соответствует буферу NNO , содержание воды 0 %, постоянное давление 2 кбар (см. рис. 4.14). Различия между использованием в качестве родительского расплава образцов 201 и 655 видны на полях K_2O , P_2O_5 и TiO_2 . Хотя результаты, полученные с помощью образца 201, выглядят несколько предпочтительней, окончательный выбор в его пользу сделать нельзя.

Изучение расплавных включений в высоко- Mg оливинах конуса 1004, принадлежащего тренду 2 и аналогичного лавам извержения 1941 года, показало содержание воды в ранней оливиновой фазе 2,6 % [Portnyagin et al., 2007b]. Однако экспериментальные исследования показывают, что для воспроизведения всей минеральной ассоциации лучше подходят сухие условия. Эти эксперименты и существование двух генераций оливинов [Флеров и др., 1980, 1984] подтверждают, что высоко- Mg расплавы были дегазированы и обезвожены в процессе подъема до основной фазы кристаллизации.

Отношение K_2O/Na_2O , как и отношения несовместимых элементов, не должно меняться при кристаллизации оливина и клинопироксена в породах тренда 1. Фракционирование пород тренда 2 показывает двойное увеличение отношения K_2O/Na_2O . Это доказывает заметную кристаллизацию плагиоклаза в породах тренда 2. Повышенные концентрации Na_2O , Ba и Sr в плагиоклазе по сравнению с K_2O и Rb , а также возрастание в породе редкоземельных элементов и отношений K_2O/Na_2O и Rb_n/Ba_n и уменьшение стронциевой аномалии – все это является следствием кристаллизации и фракционирования плагиоклаза. В результате отношение Rb_n/Ba_n вырастает больше единицы, а аномалия по

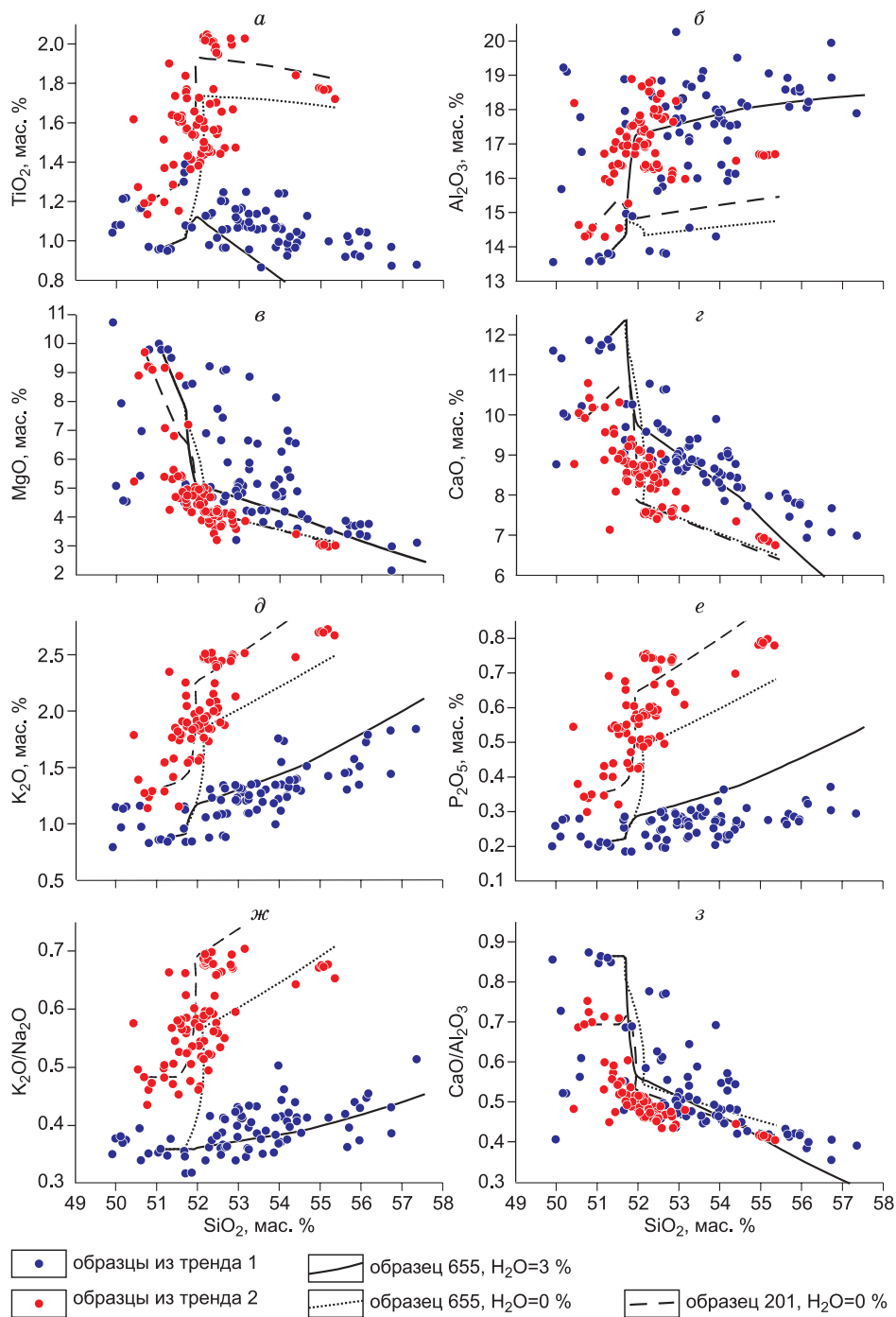


Рис. 4.14. Диаграммы Харкера и зависимости K_2O/Na_2O и CaO/Al_2O_3 от SiO_2 , показывающие расчетные траектории фракционной кристаллизации базальтовых магм Толбачинского вулканического массива в сравнении с реальными составами пород.

Дополнительно приведены данные из работ [Bryant et al., 2011; Churikova et al., 2001; Волюнец и др., 2013], из них образцы 655, 6022, TOL-96-02/1, TOL-96-02/2, TOL-96-04b, TOL-97-03 и TOL-97-04 относятся к тренду 1, остальные – к тренду 2. Сплошной линией показаны результаты расчетов для пород тренда 1 при водонасыщенных условиях из родительского расплава, аналогичного образцу 655; пунктирной – результаты расчетов для пород тренда 2 при сухих условиях из родительского расплава, аналогичного образцу 655; штриховой – результаты расчетов для пород тренда 2 при сухих условиях из родительского расплава, аналогичного образцу 201

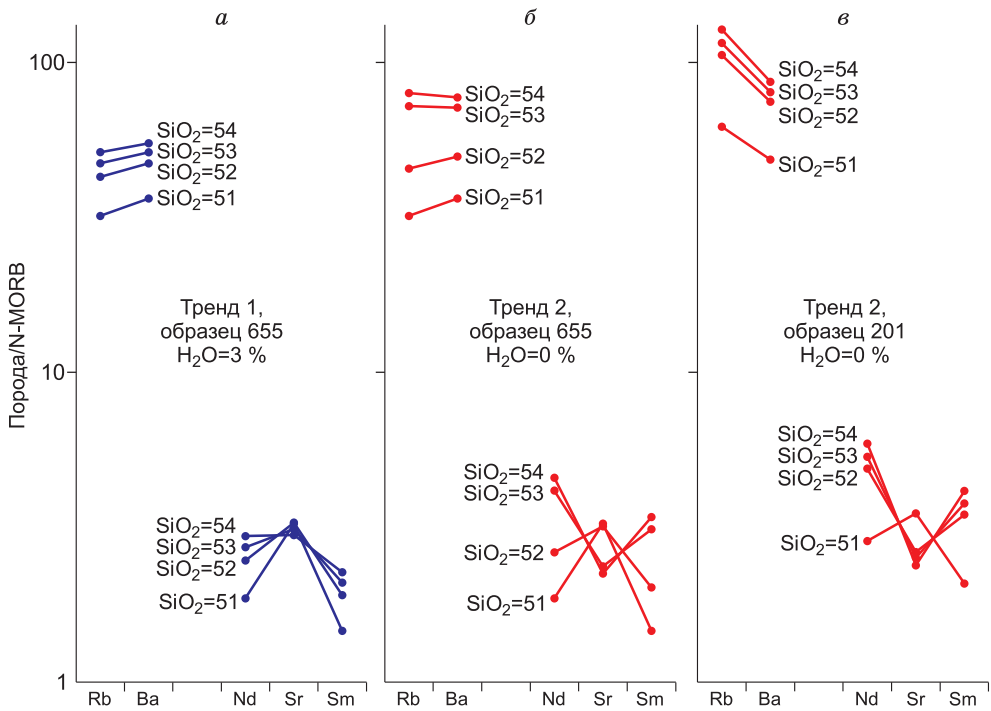


Рис. 4.15. Компьютерное моделирование эволюции части спайдер-диаграммы при фракционной кристаллизации в образцах 655 и 201 [Churikova et al., 2001] во влажных (*а*) и сухих (*б*) условиях и образец 201 в сухих условиях (*в*)

стронцию становится отрицательной. На рис. 4.15 показаны результаты численного моделирования содержания Rb, Ba, Nd, Sr, Sm на различных этапах фракционной кристаллизации при изменении содержания кремния от 51 до 54 %. При водонасыщенных условиях ($H_2O = 3\%$) в образце 655 отношение Rb_n/Ba_n остается менее 1 и сохраняется положительная Sr-аномалия вплоть до $SiO_2 = 54\%$ (см. рис. 4.15, *а*). В противоположность этому, при сухих условиях в образце 655 при $SiO_2 = 54\%$ отношение Rb_n/Ba_n становится более 1, а положительная Sr-аномалия превращается в отрицательную (см. рис. 4.15, *б*). Для расплава, аналогичного образцу 201 из тренда 2, рост отношения Rb_n/Ba_n и переход от положительной Sr-аномалии к отрицательной выражены еще больше (см. рис. 4.15, *в*).

Содержания макроэлементов в образцах 655 и 201 близки, за исключением калия и фосфора. Моделирование концентраций рубидия и иттербия хорошо согласуется с эволюцией состава пород тренда 1 для образца 655 при влажных условиях и состава пород тренда 2 для образца 201 при сухих условиях (рис. 4.16). В то же время результаты моделирования для образца 655 при сухих условиях дают систематически заниженные концентрации как рубидия, так и иттербия. Таким образом, результаты численного моделирования микроэлементов показывают, что образец 201 как родительский расплав предпочтительнее для моделирования пород тренда 2.

Не следует относиться к $P-T-H_2O-fO_2$ условиям, выбранным для расчетов (см. рис. 4.14–4.16), как к единственно возможным. Эти условия могут и должны определяться различными методами, и они, вообще говоря, не должны совпадать для пород одного и другого трендов. Вычисления, выполнен-

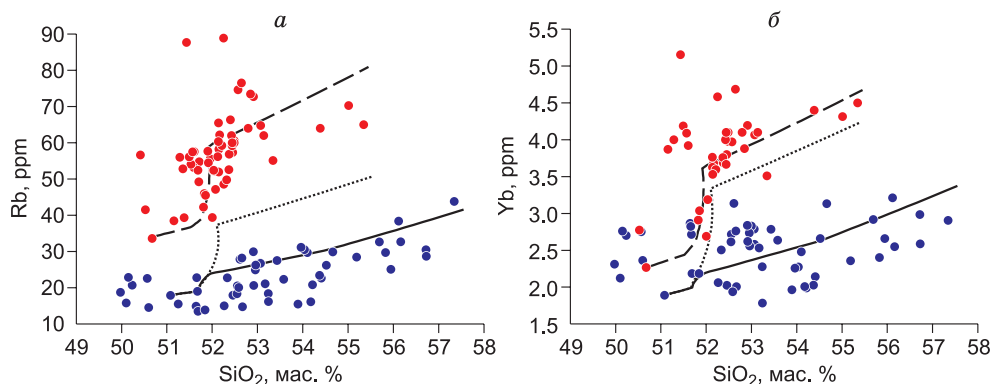


Рис. 4.16. Компьютерное моделирование фракционной кристаллизации базальтовой магмы для Rb (а) и Yb (б) для образцов 655 и 201 [Churikova et al., 2001].

Усл. обозн. см. на рис. 4.14

ные с разным содержанием воды при прочих равных условиях, подчеркивают главное различие между породами двух трендов: кристаллизация в сухих и водонасыщенных условиях. Наши данные и результаты расчетов находятся в соответствии с экспериментами, выполненными для сухих и влажных условий кристаллизации ферробазальтовых магм [Botcharnikov et al., 2008].

Ясное разделение пород на два тренда и в ряде случаев отсутствие зон перекрытия фигуративных точек обоих трендов (см. рис. 4.4–4.7, 4.10–4.13) предполагает отсутствие смешения между расплавами двух трендов.

Изотопные соотношения между стратиграфическими комплексами.

Данные изотопов в вулканитах показывают, что изотопные соотношения зависят не от принадлежности породы к какому-либо тренду, а определяются принадлежностью породы к определенному стратиграфическому комплексу. Все породы шлаковых конусов, как высокомагнезиальные базальты Северного прорыва БТТИ, так и высококалийные базальты, занимают на графике единую область с низкими стронциевыми ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) и высокими неодимовыми ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) отношениями изотопов. В то же время породы даек, стратовулканов и пьедестала имеют более высокие стронциевые и несколько заниженные неодимовые изотопные соотношения (см. рис. 4.8). Даже образцы стратовулкана Плоский Толбачик (TOL-12-38) и дайки (TOL-12-50), показывающие высокое содержание калия и имеющие макро- и микроэлементные геохимические признаки тренда 2, обогащены по стронцию больше, чем породы конусов (см. рис. 4.9).

Следовательно, обогащение изотопами стронция и сопутствующее легкое обеднение изотопами неодима не связаны с геохимическими различиями между трендами 1 и 2, а определяются предшествующими извержению процессами в подводящих магматических каналах. Несмотря на то что добавка субдукционного флюида могла бы повлиять на увеличение радиогенного стронция, в породах пьедестала, стратовулкана и дайкового комплекса не наблюдается обогащения подвижными с флюидом элементами в сравнении с породами конусов.

Наблюдаемые данные изотопной систематики можно объяснить контаминацией в коровом магматическом очаге. Отношение изотопов стронция $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в лавах меняется от 0.70333 до 0.70359 (см. рис. 4.8, 4.9). Наименьшее значение 0.703343 ± 6 (среднее по четырем образцам: три шлаковых конуса и

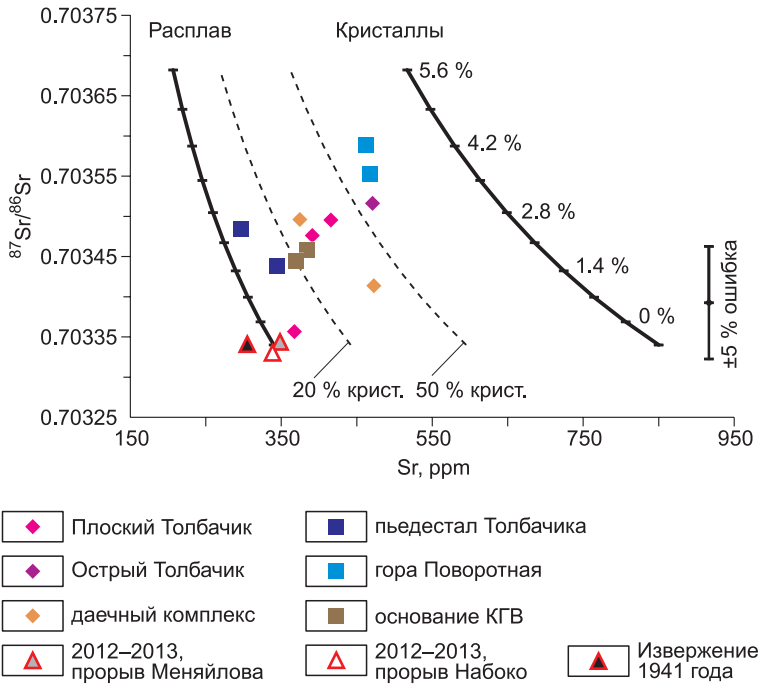


Рис. 4.17. AFC-моделирование для пород Толбачинского вулканического массива.

Сплошные линии – траектории эволюции расплавов и кристаллов; количество ассимилированного вещества показано в процентах справа от линии эволюции кристаллов. Штриховые линии соответствуют траекториям эволюции расплавов с 20 и 50 % кристаллов. Обозн. см. на рис. 4.2.

вершинная лава стратовулкана) указывает на отсутствие (или ничтожно малое количество) корового материала в базальтах конусов. В образцах пьедестала, стратовулкана и дайкового комплекса отношение изотопов стронция становится выше (среднее по семи образцам – 0.703474 ± 8), и максимально для образцов горы Поворотной (среднее по двум образцам – 0.703571 ± 7) (см. табл. 4.4, рис. 4.8). Предположение о контаминации корового материала породами пьедестала, стратовулкана и дайкового комплекса подтверждается обогащением Th/Ta (см. рис. 4.7, z), Th/Nb и La/Sm (см. рис. 4.7, e) в этих породах по сравнению с лавами конусов.

Для интерпретации полученных результатов использовалась AFC-модель [De Paolo, 1981]. Начальный расплав в наших расчетах содержал 340 ppm стронция с отношением изотопов $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70333$, что соответствует средним значениям в породах моногенных конусов. Геологическая обстановка, так же как и геофизические данные, свидетельствует о том, что палеозойский кристаллический фундамент под Ключевской группой вулканов может быть представлен Камчатской и Колпаковской сериями [Виноградов и др., 1991]. Породы этих серий состоят из сланцев и гнейсов со средними концентрациями стронция около 240 ppm и отношением изотопов $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7070$ [Виноградов и др., 1988, 1991], а вот данные по неодимовым изотопам для этих пород отсутствуют, поэтому AFC-модель строилась только для изотопов стронция.

Зависимость изотопного состава от концентрации стронция для пород Толбачинского вулканического массива и результаты расчета по модели AFC показаны на рис. 4.17. Результаты согласуются с моделью в том случае, если предположить, что не все кристаллы удалены из расплава: составы кристаллов

и расплава, предсказанные моделью, показаны жирными линиями. Вычисленное отношение ассимилированной и кристаллизованной масс составляет 0.2. Общий коэффициент распределения $D_{Sr} = 3.5$, что следует из средних соотношений фенокристов в вулканических породах: $Pl : Ol : Aug : Mt = 75 : 10 : 10 : 5$, коэффициенты распределения минерал/расплав взяты из [Henderson, 1982]. Количество ассимилированного материала показано справа от линии эволюции кристаллов на рис. 4.17.

Наши простые вычисления показывают вовлечение около 3–4 % контаминированного материала для пород горы Поворотной и около 2 % – для пород пьедестала, стратовулканов и дайкового комплекса. Высокие концентрации $\delta^{18}O$ (7.1‰) и $^{187}Re/^{188}Os$ – в пять раз выше в стратовулкане Плоского Толбачика, чем в моногенных конусах [Alves et al., 1999; Pineau et al., 1999], также могут являться результатом процессов контаминации коровым материалом. Эти данные подтверждаются находкой корового ксенолита в породах стратовулкана Острый Толбачик [Флеров и др., 2015].

Прорыв Меняйлова и основание КГВ – сходства и различия. Высоко-К породы в пределах ЦКД встречаются в основании КГВ, на Толбачинском массиве, на массиве Плоские Сопки, а также на вулкане Николка [Churikova et al., 2001; Флеров и др., 2017]. Генезис высоко-К пород до сих пор не вполне понятен. Мы проанализировали шесть образцов из основания КГВ [Churikova et al., 2015b] и провели их сравнение с образцами массива Плоские Сопки [Чурикова, 1993; Чурикова, Соколов, 1993; Флеров и др., 2017]. Сравнение показало, что обе серии относятся к высоко-К вулканитам, они идентичны по содержанию макро-, микроэлементов и изотопов.

Как было показано ранее, породы основания КГВ близки породам прорыва Меняйлова по большинству макроэлементов (см. рис. 4.4, 4.5), предполагая единые механизмы формирования для обеих групп пород. Большинство соотношений микроэлементов в лавах тренда 2 и в породах основания КГВ также близки (см. рис. 4.7, а, б, д).

Однако при детальном рассмотрении наблюдаются определенные различия между, с одной стороны, породами прорыва Меняйлова и, с другой стороны, породами основания КГВ и высоко-К породами массива Плоские Сопки. Эти различия можно найти и в распределении микроэлементов, и в изотопных соотношениях. Отношение Rb_n / Ba_n в высоко-К породах прорыва Меняйлова больше 1, в то время как в породах основания КГВ оно меньше 1 при близких значениях концентрации Sr (рис. 4.18, а). С другой стороны, высоко-К лавы массива Плоские Сопки характеризуются более высокими отношениями $^{87}Sr/^{86}Sr$, чем лавы прорыва Меняйлова. Более того, высоко-К породы массива Плоские Сопки обогащены радиогенным Sr в сравнении с умеренно-К лавами того же массива, в то время как лавы прорыва Меняйлова обеднены по $^{87}Sr/^{86}Sr$ в сравнении с умеренно-К лавами Толбачинского массива (см. рис. 4.18, б).

Отсюда следует, что высоко-К серии пород, извергавшиеся на различных вулканах КГВ, могут не иметь генетических связей. Ранее показано [Чурикова, 1993], что фракционная кристаллизация в сухих и водонасыщенных условиях может являться причиной появления двух (умеренно-К и высоко-К) серий пород на массиве Плоские Сопки. В этом случае различия в геохимии высоко-К пород могут отражать разницу в составах родительских расплавов под разными вулканическими постройками.

Гора Поворотная. Гора Поворотная представляет собой отдельную разрушенную постройку, расположенную на северо-восточном склоне Толбачин-

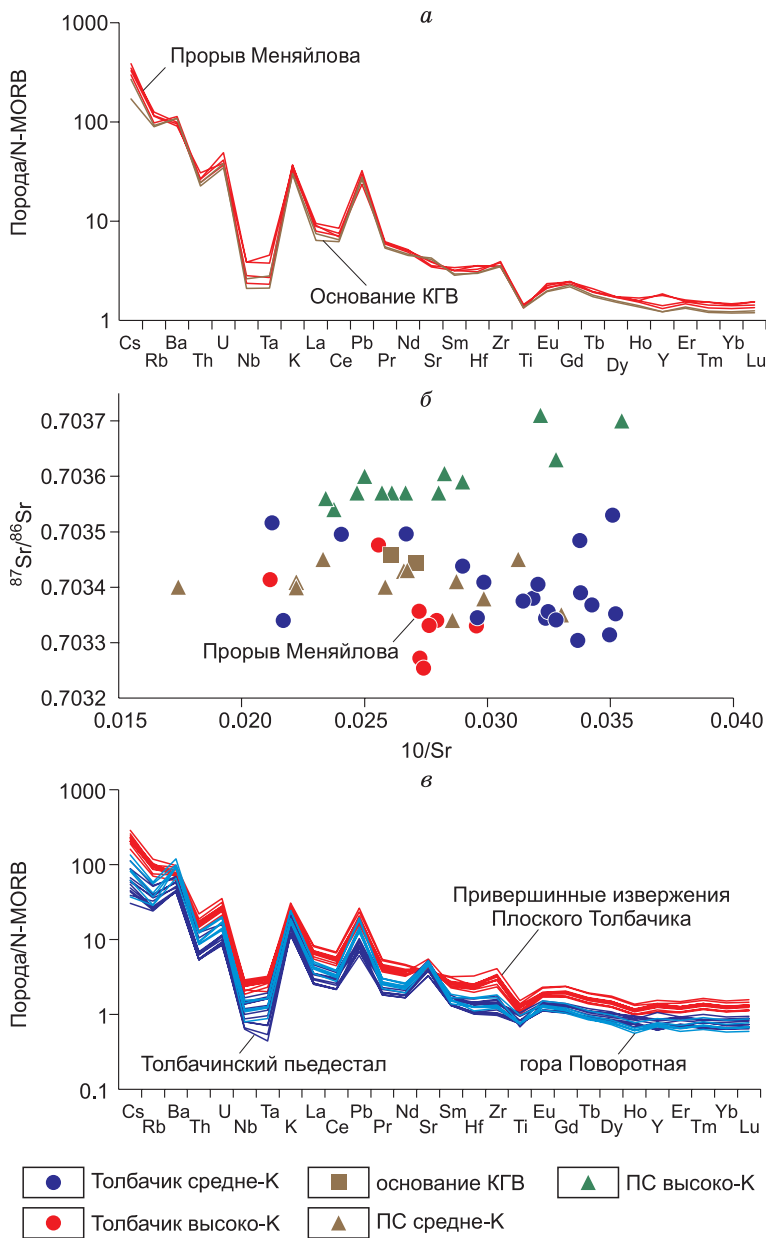


Рис. 4.18. Геохимические особенности пород прорыва Меняйлова, горы Поворотной и лав основания КГВ.

а – распределение микроэлементов в лавах прорыва Меняйлова (серые линии) и в породах основания КГВ (черные линии). Дополнительно мы использовали данные, полученные для пород прорыва Меняйлова из работы [Вольнец и др., 2013]; *б* – зависимость $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ от $10/\text{Sr}$ в породах Толбачинского массива и массива Плоские Сопки (ПС). Диаграмма дополнена данными из работ [Чурикова, Соколов, 1993; Portnyagin et al., 2007a]; *в* – распределение микроэлементов в лавах горы Поворотной в сравнении с породами вершинных излияний вулкана Плоский Толбачик и пьедестала Толбачинского массива

ского вулканического массива в 8 км от Плоского Толбачика (см. рис. 4.3, *а*). О природе этой постройки существует ряд мнений. Б.И. Пийп полагал, что гора Поворотная является отсеченным отрогом Толбачинского стратовулкана [Пийп, 1954]; в работе [Ермаков, Важеевская, 1973] гора Поворотная считает-

ся блоком пьедестала Толбачинского массива; на карте из работы [Брайцева и др., 1984а] гора Поворотная отмечена как фрагмент верхнеплейстоценового лавового плато; в работе [Андреев, Топчиева, 2013] указывается, что гора Поворотная соответствует общепринятым представлениям о строении и развитии стратовулкана. Все эти мнения подразумевают тот факт, что гора Поворотная образовалась там, где и находится в настоящее время. Однако авторы работ [Мелекесцев, Брайцева, 1984] и [Ponomareva et al., 2006] высказывают принципиально иную точку зрения и рассматривают гору Поворотную как крупный неразрушенный обвальный фрагмент, так называемый торева-блок [Reiche, 1937], съехавший с вершины вулкана Плоский Толбачик 6500 лет назад.

Наши геологические наблюдения показали, что постройка горы Поворотной имеет структуру, подобную стратовулкану, и состоит из двух несогласно залегающих пачек пород. Лавовые потоки нижней части постройки имеют углы наклона около 30° с падением на запад-юго-запад, в то время как верхние слои залегают субгоризонтально. В нижней части постройки преобладают авгитофировые породы. Лавы верхней пачки обогащены Р1 и О1, но также содержат фенокристаллы Срх размером до 0.5–1 см. Породы, насыщенные крупными фенокристаллами Срх, также часто наблюдаются в пьедестале Толбачинского массива, но не были встречены не только в других его комплексах, но и на других объектах КГВ.

Геохимические особенности пород горы Поворотной показаны на рис. 4.4, 4.5, 4.18, в. Все лавы горы Поворотной относятся по макроэлементам к тренду 1 и характеризуются андезибазальтовыми составами (SiO_2 52.7–55.7 мас. % при Mg\# 43–60). Распределение микроэлементов в этих лавах близко породам пьедестала Толбачинского массива с обедненным спектром распределения несовместимых элементов и низкими значениями HFSE (см. рис. 4.18, в). Тем не менее, в отличие от пород пьедестала, лавы горы Поворотной обнаруживают обогащение по Cs, Ba, Pb и Sr (см. рис. 4.18, в), предполагая большую добавку корового материала в их первичные расплавы. Это предположение также подтверждается тем, что лавы горы Поворотной наиболее обогащены по отношению $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и обеднены по $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в сравнении с другими породами Толбачинского массива (см. рис. 4.8, 4.9).

Петрологические и геохимические данные, а также данные К-Аг датирования свидетельствуют, что гора Поворотная не может являться частью вершины вулкана Плоский Толбачик, а, вероятнее всего, является блоком пьедестала Толбачинского массива, как утверждалось в работе [Ермаков, Важеевская, 1973]. Гора Поворотная с возрастом 306 ± 10 тыс. лет обнаруживает не только более ранний возраст, чем породы пьедестала Толбачинского массива, обнажающиеся вблизи вулкана (86 ± 16 тыс. лет), но также является на сегодня наиболее древней датированной постройкой в КГВ.

4.5. ГЕОХИМИЧЕСКОЕ РАЗВИТИЕ ТОЛБАЧИНСКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО МАССИВА

На основании полученных геологических и геохимических данных о различных комплексах пород Толбачинского вулканического массива можно восстановить историю его геохимической эволюции следующим образом.

В среднем–верхнем плейстоцене происходило формирование пьедестала Толбачинского массива и на поверхность поступали обедненные микроэлементами умеренно-К высоко-Мг (Mg\# 43–64) породы, относящиеся к тренду 1. Эти лавы формировали щитовой вулкан с пологозалегающими лавовыми потоками.

Последующая эволюция связана с процессами дифференциации родительского расплава в коровых очагах на относительно небольших глубинах. Ее производные, представленные умеренно-К магмами тренда 1 с более низкой магнезиальностью ($Mg\#$ 37–55), формируют стратовулканы. Эти магмы обеднены относительно N-MORB, обладают островодужными характеристиками и фракционируют в условиях повышенного содержания воды. Согласно изотопным данным, часть пород пьедестала массива и стратовулканов обнаруживают признаки коровой контаминации.

С изменением геодинамического режима на границе позднего плейстоцена–голоцена меняется характер вулканизма и состав магм. Растяжение коры и образование разломов сопровождалось поступлением магм из глубинных горизонтов магматического источника. Они обогащены микроэлементами относительно N-MORB или сравнимы с ним и обладают как островодужными признаками, так и рифтогенными характеристиками. Раскрытие трещины способствовало дегазации расплавов на относительно малых глубинах и их фракционированию в безводных условиях. Эти магмы проявились на последних стадиях формирования стратовулканов, переслаиваясь лавами тренда 1, и получили широкое распространение в зоне моногенных конусов на всем ее протяжении. Они обогащены по K, P, Ti и всем несовместимым элементам, формируют отчетливый тренд 2 на всех геохимических диаграммах.

Последняя дегляциация в начале голоцена привела к усилению эффекта декомпрессии в районе КГВ [Sigvaldson et al., 1992; Simakin, Shaposhnikova, 2016]. Это способствовало формированию многочисленных шлаковых и шлаколавовых конусов, включая современные извержения.

Преобладание извержений высоко-К магм сохранялось весь период работы трещинной зоны вплоть до настоящего времени. В то же время проявление в этой зоне в разное геологическое время извержений высоко-Mg базальтов с геохимическими характеристиками тренда 1, включая исторические (конус Красный, Северный прорыв БТТИ 1975 г.), свидетельствует о существовании источника умеренно-К родительских расплавов до настоящего времени.

ВЫВОДЫ

1. Толбачинский вулканический массив, включающий пьедестал, стратовулканы Острый Толбачик и Плоский Толбачик, дайки и наложенную зону шлаковых и шлаколавовых конусов, сложен вулканитами двух петрохимических серий: умеренно-К и высоко-К с различными содержаниями макро- и микроэлементов и их отношений. Эти две серии по геохимическим характеристикам определяют два тренда эволюции магм.

2. Вулканическая активность в районе Толбачинского массива началась с образования большого вулканического пьедестала, представленного умеренно-К серией пород. Мантийный источник, обедненный в сравнении с источником N-MORB, являлся тем резервуаром, который продуцировал магмы пьедестала и лавы, извергавшиеся на первых этапах формирования стратовулканов. Этот источник остается активным до настоящего времени, поставляя высоко-Mg базальты в зону моногенных конусов не только в голоценовое, но и в историческое время (Северный прорыв БТТИ).

3. Породы высоко-К серии систематически обогащены щелочами, TiO_2 , P_2O_5 и всеми несовместимыми элементами по сравнению с источником N-MORB. Эти породы переслаивались с умеренно-К породами на поздних стадиях деятельности стратовулканов и доминировали в зоне моногенных ко-

нусов. Массовое поступление высоко-К магм на всем протяжении трещинной зоны связано с изменением геодинамического режима в начале голоцена, что выразилось в образовании глубоких разломов, способствовавших поступлению расплавов с глубинных слоев мантийного источника в условиях растяжения. Эти расплавы близки к умеренно-К по макроэлементам, но обогащены микроэлементами.

4. Происхождение двух серий пород Толбачинского вулканического массива объясняется нами образованием в разной степени обогащенных расплавов на различной глубине одного мантийного источника и последующим процессом фракционной кристаллизации при различных содержаниях воды в расплавах родительских магм. Умеренно-К породы кристаллизовались при водонасыщенных условиях. Глубокие разломы вызвали дегазацию и обезвоживание поднимающихся расплавов, и кристаллизация высоко-К пород проходила в «сухих» условиях. Такая модель, по нашему мнению, объясняет все вариации макро- и микроэлементов в породах Толбачинского вулканического массива и показывает, что фракционная кристаллизация при различных $P-T-H_2O-fO_2$ условиях может быть одним из главных процессов, ответственных за разнообразие пород в КГВ.

5. Обогащение пород пьедестала, стратовулканов и даек радиогенным Sr при обеднении их по Nd изотопам объясняется ассимиляцией небольшого количества (2–4 %) корового материала. Лавы же моногенных конусов не обнаруживают никаких признаков присутствия корового вещества. Такое различие говорит о быстром, исключаящем ассимиляцию с корой режиме подъема магмы в наложенной зоне моногенных конусов.

6. Сходство пород горы Поворотной по петрографическому, химическому и микрохимическому составу с породами пьедестала Толбачинского массива, а также результаты K-Ar датирования показывают, что гора Поворотная является относительно старым блоком Толбачинского пьедестала.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы главы благодарны всем коллегам ИВиС ДВО РАН, помогавшим в организации и проведении полевых работ: О.Е. Богдаду, Ю.В. Демянчуку, Н.П. Егоровой, Я.Д. Муравьеву, А.А. Овсянникову, В.П. Федуловой. Особых слов признательности заслуживают наши волонтеры, непосредственно участвовавшие в полевых работах: К.Д. Горохов, А.В. Колчина, А.Я. Муравьев, Е.А. Никонова, Д.В. Окопный, Е.И. Чесалова и спасатель М.М. Ярин. Многочисленные дискуссии с И.В. Мелекесцевым оказали неоценимую помощь при написании работы. Это исследование было поддержано грантами РФФИ-JSPS № 13-05-92104 и РФФИ-DFG № 16-55-12040.

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., Цимбаллист 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., Пушкарев 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 просвечивание 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, предварявшееся 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.** Тефрохронологические 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 геохрологическим 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.
- Горбатиков А.В., Степанова М.Ю.** Результаты исследований статистических характеристик и свойств стационарности низкочастотных микросейсмических сигналов // Физика Земли. 2008. № 1. С. 57–67.
- Горбатиков А.В., Ларин Н.В., Моисеев Е.И., Беляшов А.В.** Применение метода микросейсмического зондирования для изучения строения погребенной трубки взрыва // Докл. АН. 2009. Т. 428, № 4. С. 526–530.
- Горбатиков 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.
- Горбатиков 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., Двига́ло 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.
- Двига́ло В.Н.** Морфологические предвестники (первые признаки) активизации некоторых вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 3–16.
- Двига́ло 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.
- Двига́ло В.Н., Федотов С.А., Чирков А.М.** Вулкан Плоский Толбачик // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. 1. С. 200–213.
- Двига́ло 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.
- Двига́ло 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., Вольнец 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, предвалявшие 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 вулканистов 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 Корякии. 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 вулканиды 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 Импер. 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., Волынец А.О.** Комплексование 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., Горбатиков 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., Горбатиков 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., Горбатиков 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 алмазодобывающей 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. Лучицкий М.: Наука, 1974. С. 162–234.
- Мелекесцев И.В., Волынец 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 содержания петрогенных, летучих и редких элементов в расплавах океанических хребтов по данным изучения включений в минералах и закалочных стеклах // 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., Флеров 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., Сулержицкий 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, предварающей 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. Структура и геодинамические особенности литосферы Курильской островной системы // Структура 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., Сеньюков 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., Горбатиков 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 извержении 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 Острога 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., Корюлюк 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 плавлениях 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., Гирина 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., Сениюков 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., Сениюков 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., Сениюков 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 простираения 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. Боншведт-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. Klempner // 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 COMAGMAT 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., Pornyagin M.V., Chen C.H. Large-volume silicic volcanism in Kamchatka. Ar-Ar and U-plages, isotopic and geochemical characteristics of major pre-holocene caldera-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., Nercessian 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., Parello 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*. 208. 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., Shmulinovich 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. Inter.* 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 I // *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 Gordeev 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., Gordeev 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., Soholz C.H.** A double 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 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., Arnosó 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 thermochemical convection in the mantle wedge // *Eart. 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., Chebrov 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 carthguac 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 Bezymianny 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 subduct-ed. 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., Yamaguohi A., Kade H. Middle Mio-cene swift migration of the TTG triple junction and rapid crustal grow the of SW Japan // *AGU Tectonics*. 2014. Vol. 33, doi 10. 1002/2014 TC 003531.

Kimura J.I., Stern R.J., Yoshida T. Re-imitiation of subduction and magmatic responses in SW Japan during Neogenic 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., Okade 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., Marugama S. Magma genesis beneath Nortulast Japan arc: a new perspectiva on subduction zone magmatism // *Gond. Res.* 2009. Vol. 16. P. 446–457.

Konstantinovskaia 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-asthenosphere 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., Tanoji T., Ohayashiki 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 in-slab 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 // 8th 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.

Petronotis 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 torevva-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-Dmagneto-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.
- Sigmarsson 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-Berzhenoy 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., Arriente 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 Bezymianny 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.

Ungler 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 Avouac 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 Hikaaru) 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 Тацуji (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 IRGP (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) (<i>М.А. Магуськин, Ю.В. Демьянчук, Н.Н. Титков, К.М. Магуськин</i>)	109
3.4. Сейсмические и деформационные события, сопровождавшие подготовку и начало ТТИ-50 и отражавшие динамику магматической системы (<i>Ю.А. Кугаенко, В.А. Салтыков, Н.Н. Титков, В.М. Павлов, П.В. Воропаев, Е.И. Иванова, И.Р. Абубакиров</i>)	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 (<i>Т.Г. Чурикова, Б.Н. Гордейчик, Г.Б. Флеров, Х. Иватори, Х. Накамура, Т. Нишизава</i>)	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. (<i>А.О. Волинец, Д.В. Мельников, И.Г. Грибоедова</i>)	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 (<i>М.Е. Зеленский, Н.А. Малик, Ю.А. Таран</i>)	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 (<i>Н.А. Малик</i>)	234
5.3.2. Эксплозивная минерализация ТТИ-50 (<i>Г.А. Карнов, В.И. Силаев, Л.П. Аникин, А.В. Мохов, Т.А. Горностаева, А.Е. Сухарев</i>)	239
Глава 6. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ТОЛБАЧИНСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ: ДАННЫЕ ПО ПЕТРОХИМИИ, ГЕОХИМИИ, ГАЗОВОМУ АНАЛИЗУ, ФАЗОВОМУ СОСТАВУ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В МИНЕРАЛАХ (<i>В.А. Симонов, П.Ю. Плечов, Н.Л. Добрецов, А.В. Котляров, Н.А. Некрылов</i>)	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. Вольнец</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