



УДК 550.34 552.321.6+552.335

Т. С. Ерёмина, С. А. Хубуная, А. В. Колосков, С. В. Москалёва

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский*

Известково-щелочные и субщелочные базальты и андезибазальты вулканов Ключевской, Харчинский и Плоский Толбачик (ТТИ-50) — вулканические продукты разноглубинной мантии

Одной из проблем магматической петрологии и геохимии является выяснение причин поперечной геохимической зональности в островных дугах [11, 12]. Известно, что поперечная геохимическая зональность поперёк островной дуги выражается в смене толеитовых (низкокалийных) базальтов на известково-щелочные (среднекалийные) и субщелочные (высококалийные), с востока на запад. В районе Ключевской группы вулканов эта закономерность нарушается, так как здесь на ограниченной площади встречены продукты известково-щелочных и субщелочных (трахибазальтовых) магм.

Введение

В сообщении даётся сравнительный изотопно-геохимический анализ продуктов извержений вулканов района Ключевской группы. Они изливались в непосредственной близости друг от друга, практически одновременно, но при этом относятся к разным геохимическим типам пород.

Объектами исследования являются известково-щелочные и субщелочные базальты и андезибазальты вулканов Ключевской, Харчинский и Плоский Толбачик, Северный прорыв БТТИ, извержение ТТИ-50 (рис. 1).

В районе Ключевской группы вулканов центры излияний известково-щелочных высокомагнезиальных, магнезиальных, глинозёмистых базальтов и андезибазальтов (вулкан Ключевской), высокомагнезиальных базальтов (Северный прорыв БТТИ), глинозёмистых базальтов вулкана Плоский Толбачик и субщелочных базальтов, андезибазальтов вулкан Плоский Толбачик (ТТИ-50) расположены в непосредственной близости друг от друга. В некоторых случаях продукты магнезиальных и трахибазальтовых магм образовались в одно и то же время (БТТИ — Северный и Южный прорывы). Позднеплейстоценовый вулкан Харчинский, расположенный вблизи вулкана Ключевской, сложен преимущественно высокомагнезиальными, магнезиальными базальтами и андезибазальтами. Они по своим петрографическим и геохимическим особенностям близки к аналогичным породам вулкана Ключевской.

Магнезиальные и глинозёмистые базальты и андезибазальты вулкана Ключевской и высокомагнезиальные, магнезиальные базальты и андезибазальты вулкана Харчинский в литературе рассмотрены достаточно подробно [3, 7, 8], поэтому мы остановимся только на результатах новых изотопно-гео-

химических данных, в том числе по трахиандезибазальтам ТТИ-50.

На классификационной диаграмме вулканические породы группируются следующим образом (рис. 2):

- северный прорыв БТТИ — высокомагнезиальные базальты;
- вулкан Харчинский — высокомагнезиальные базальты и андезибазальты;
- вулкан Ключевской — высокомагнезиальные, магнезиальные и глинозёмистые базальты и андезибазальты;
- ТТИ-50 — трахиандезибазальты.

Высокомагнезиальные и магнезиальные базальты и андезибазальты вулканов Харчинский и Ключевской всегда порфиновые породы (рис. 3). Высокомагнезиальные базальты БТТИ — субафировые. Все они схожи по своему минеральному составу. Среди фенокристаллов присутствуют высокомагнезиальные оливины и клинопироксены в различных соотношениях. Оливин, как правило, преобладает. Эти оливины неравновесны с химическим составом пород, в которых они находятся. В то же время они могут быть равновесны к составам мантийных выплавов [7].

Геохимическая близость глинозёмистых и магнезиальных андезибазальтов отражена в их минеральном составе. Так же, как и высокомагнезиальные базальты, магнезиальные и глинозёмистые андезибазальты характеризуются присутствием вкрапленников неравновесного высокомагнезиального оливина и клинопироксена. Но они более редки и соседствуют с крупными лейстами и таблицами основного плагиоклаза (рис. 4). Соотношения между темными минералами и плагиоклазом во вкрапленниках — разные, но чаще сопоставимые, без резкого доминирования одних над другими.

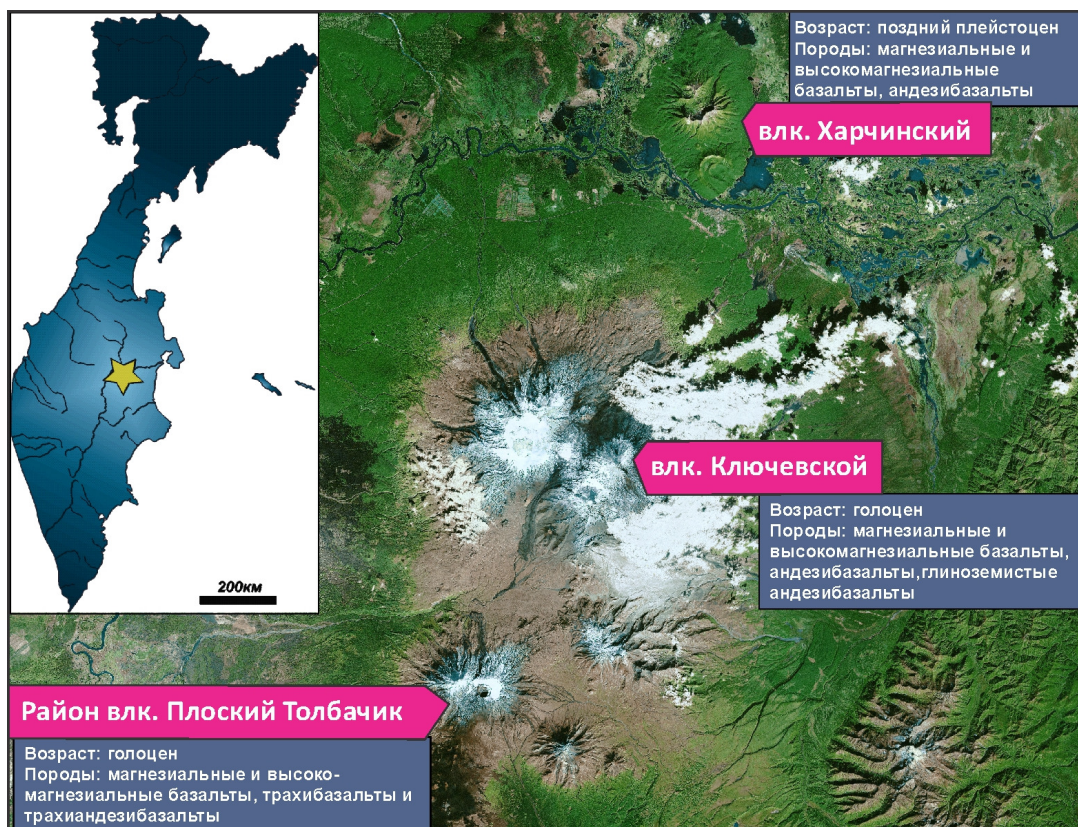


Рис. 1. Космический снимок района Ключевской группы вулканов и вулкана Харчинский

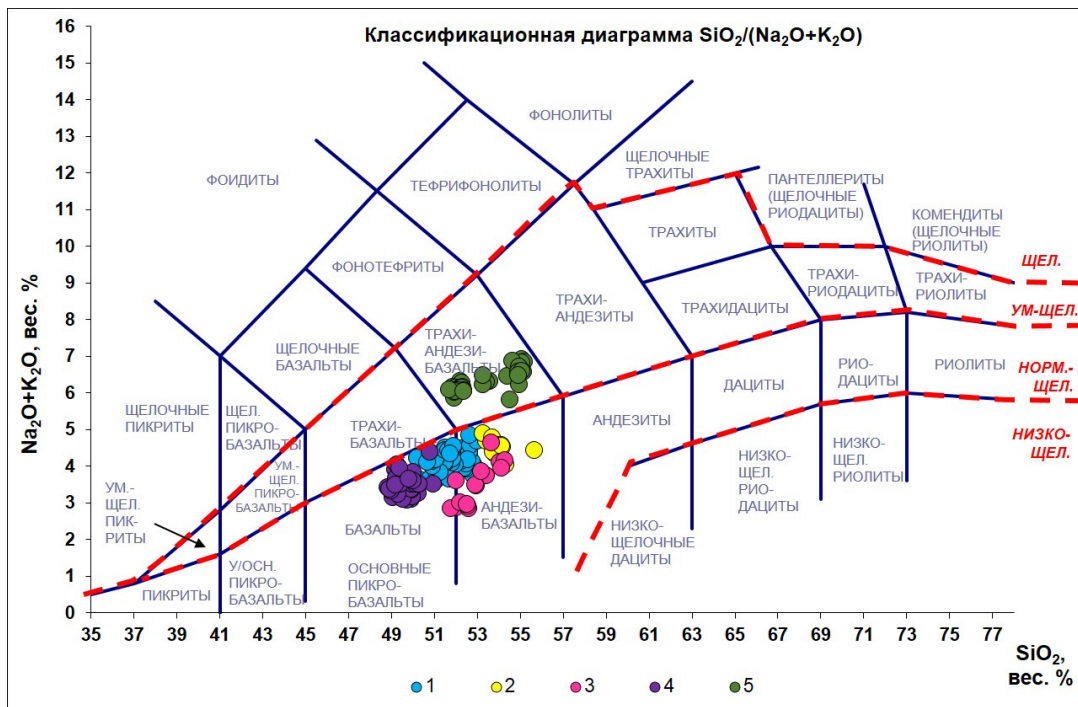


Рис. 2. Составы пород вулканов Ключевской, Харчинский, района Плоского Толбачика на классификационной диаграмме $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{SiO}_2$ [6]. Условные обозначения: 1 – магнезиальные базальты, андезибазальты вулкана Харчинский; 2 – глиноземистые андезибазальты вулкана Ключевской; 3 – магнезиальные, высокомагнезиальные базальты, андезибазальты вулкана Ключевской; 4 – магнезиальные базальты Северного прорыва БТТИ; 5 – трахиандеибазальты (ТТИ-50)

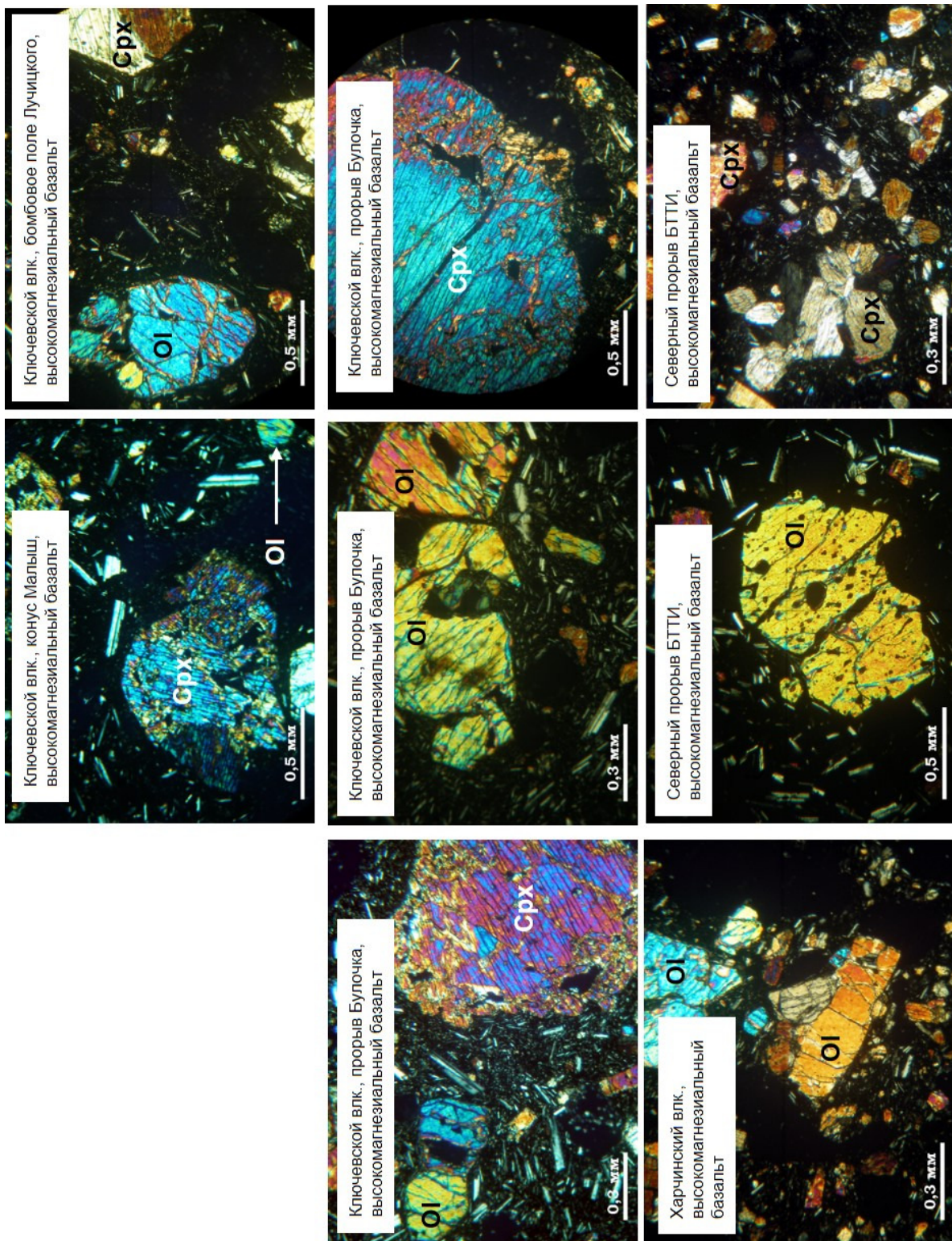


Рис. 3. Микрофотографии магнезиальных базальтов и андезибазальтов вулканов Харчинский, Ключевской

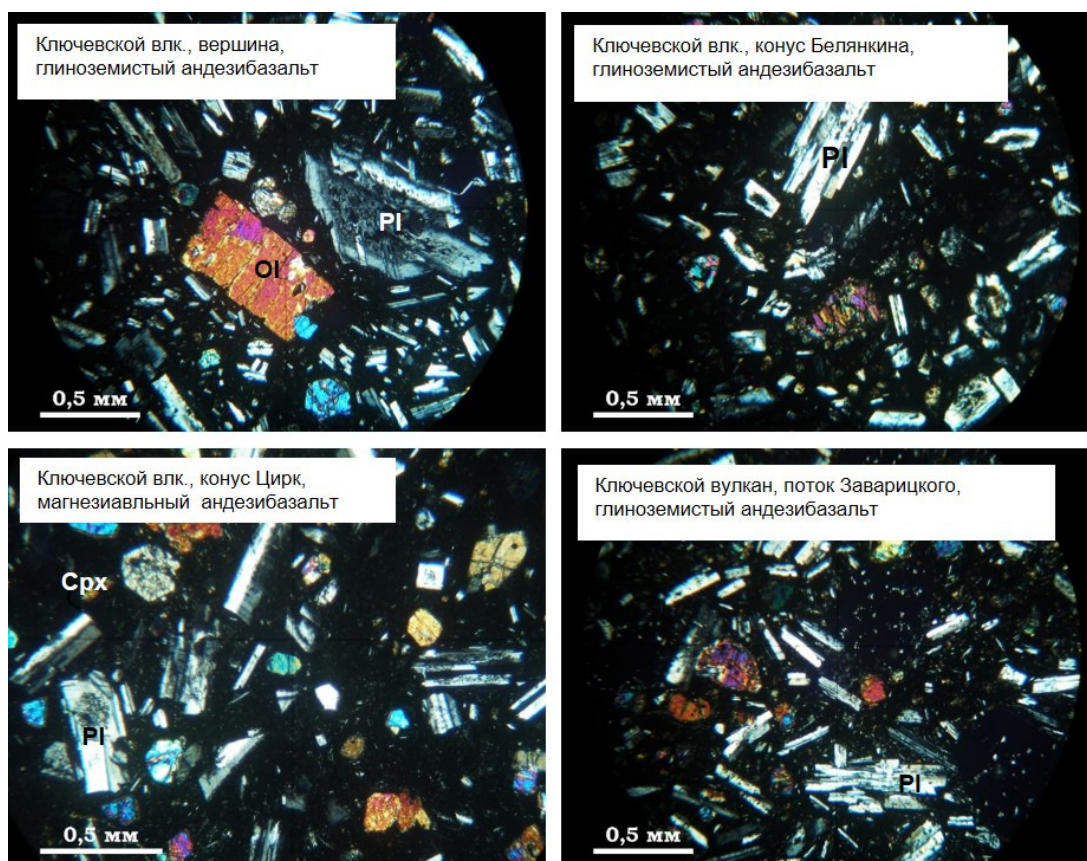


Рис. 4. Микрофотографии магниевых и глинозёмистых андезибазальтов Ключевского вулкана

Балансовые расчёты, проведённые над высокомагнезиальными базальтами прорыва Булочки и андезибазальтами эксплозивного конуса Цирк показали 100% петрохимическую сходимость расчётного и реального составов андезибазальтов прорыва Цирк, за счёт удаления части Ol и Срх из высокомагнезиальных базальтов Булочки [7].

Следует подчеркнуть, что для выяснения генезиса порфировых пород необходимо привлекать составы минералов. Исходный состав порфировых пород всегда вызывает вопросы, так как порфировые магмы почти всегда подвержены процессам кристаллизационно-гравитационной дифференциации [2, 7].

Близость условий кристаллизации магниевых и глинозёмистых андезибазальтов из одного источника хорошо видно на вариационных диаграммах, отражающих зависимость содержаний SiO_2 от магнезиальности оливинов (рис. 5), содержаний CaO от магнезиальности оливинов. Во всех рассматриваемых базальтах Ol кристаллизуется на ликвидусе базальтового расплава и заканчивает кристаллизоваться в основной массе породы. Таким образом, рассмотрев историю кристаллизации Ol можно понять и историю становления изучаемых пород.

Как следует из рис. 5, содержание SiO_2 в Ol всех пород монотонно падает с уменьшением магнезиальности Ol. При этом составы оливинов также одинаково изменяются от Fo 41 до Fo 37–38 во всех рассматриваемых вулканиках. Концентрации Cr и Ni

в оливинах всех рассматриваемых вулкаников также одинаково падают с уменьшением его магнезиальности, а Co и Mn напротив — возрастают.

Особенно это хорошо видно на вариационных диаграммах содержания CaO от магнезиальности Ol (рис. 6). Здесь все вулканики, вне зависимости от возраста и места извержения, характеризуются одинаковыми яркими особенностями, свидетельствующими об их совместном генезисе:

1. Среди оливинов всех пород присутствуют кристаллы, которые не могли кристаллизоваться из расплава соответствующего состава породы, в которой эти оливины находятся — неравновесные оливины [7].

2. Во всех оливинах содержание CaO сначала незначительно падает, с падением магнезиальности оливина, а затем резко возрастает — после 80 номера.

Такая же зависимость содержаний CaO от магнезиальности оливинов наблюдается и в высокомагнезиальных и магнезиальных базальтах и андезибазальтах вулкана Харчинский (рис. 7). Здесь, как и в высокомагнезиальных, магнезиальных и глинозёмистых базальтах и андезибазальтах вулкана Ключевской фиксируются неравновесные оливины и резкое возрастание содержаний кальция в оливинах после 80 номера их магнезиальности. Очевидно, что источник исходных расплавов для всех рассматриваемых пород был один и тот же.

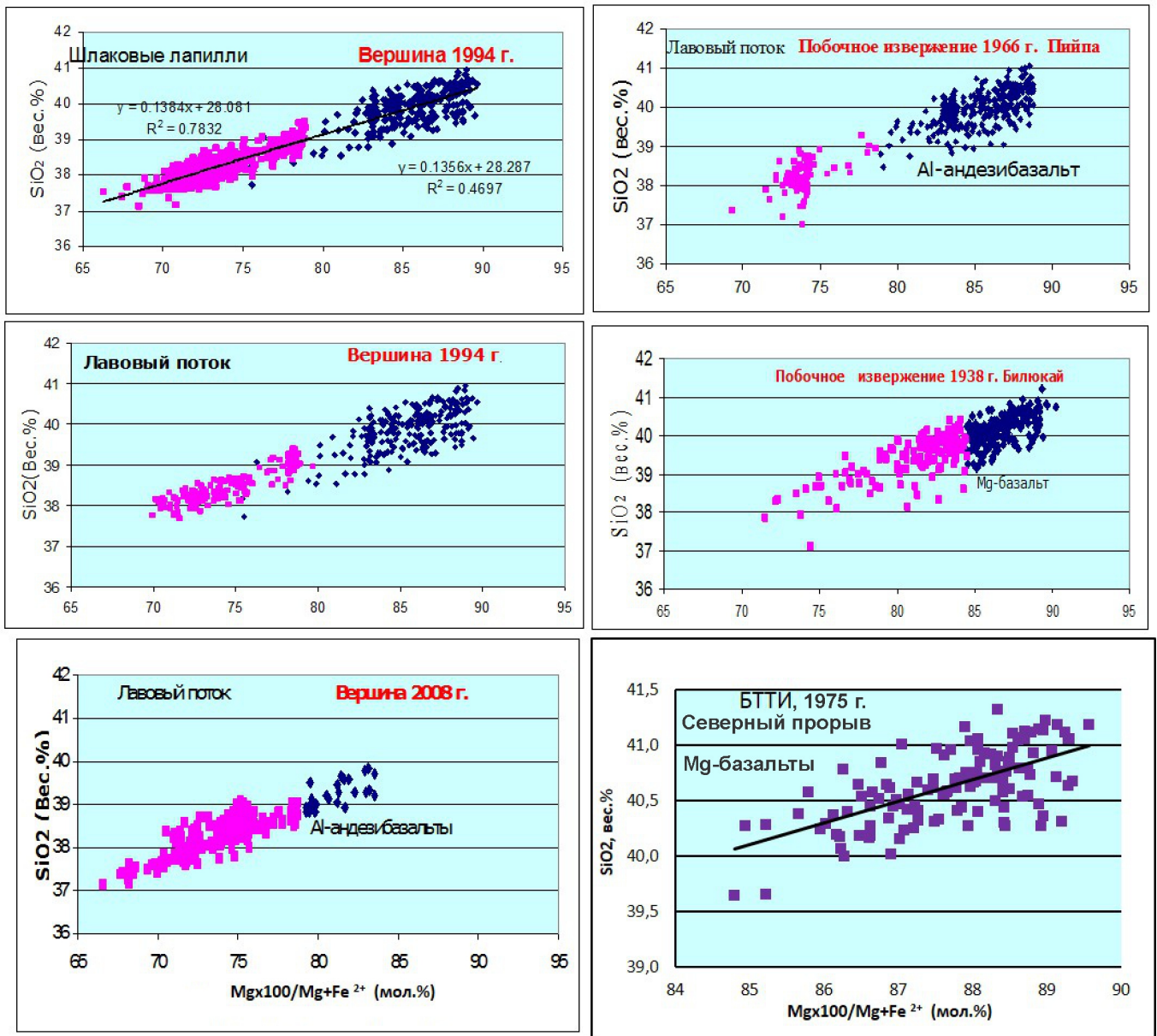


Рис. 5. Зависимость содержания SiO₂ в ОI от его магнезиальности в высокомагнезиальных базальтах, магнезиальных и глинозёмистых андезибазальтах вулкана Ключевской и Северного прорыва БТТИ. Условные обозначения: розовым и синим цветами показаны фигуративные точки составов оливинов равновесных и неравновесных с составом породы соответственно.

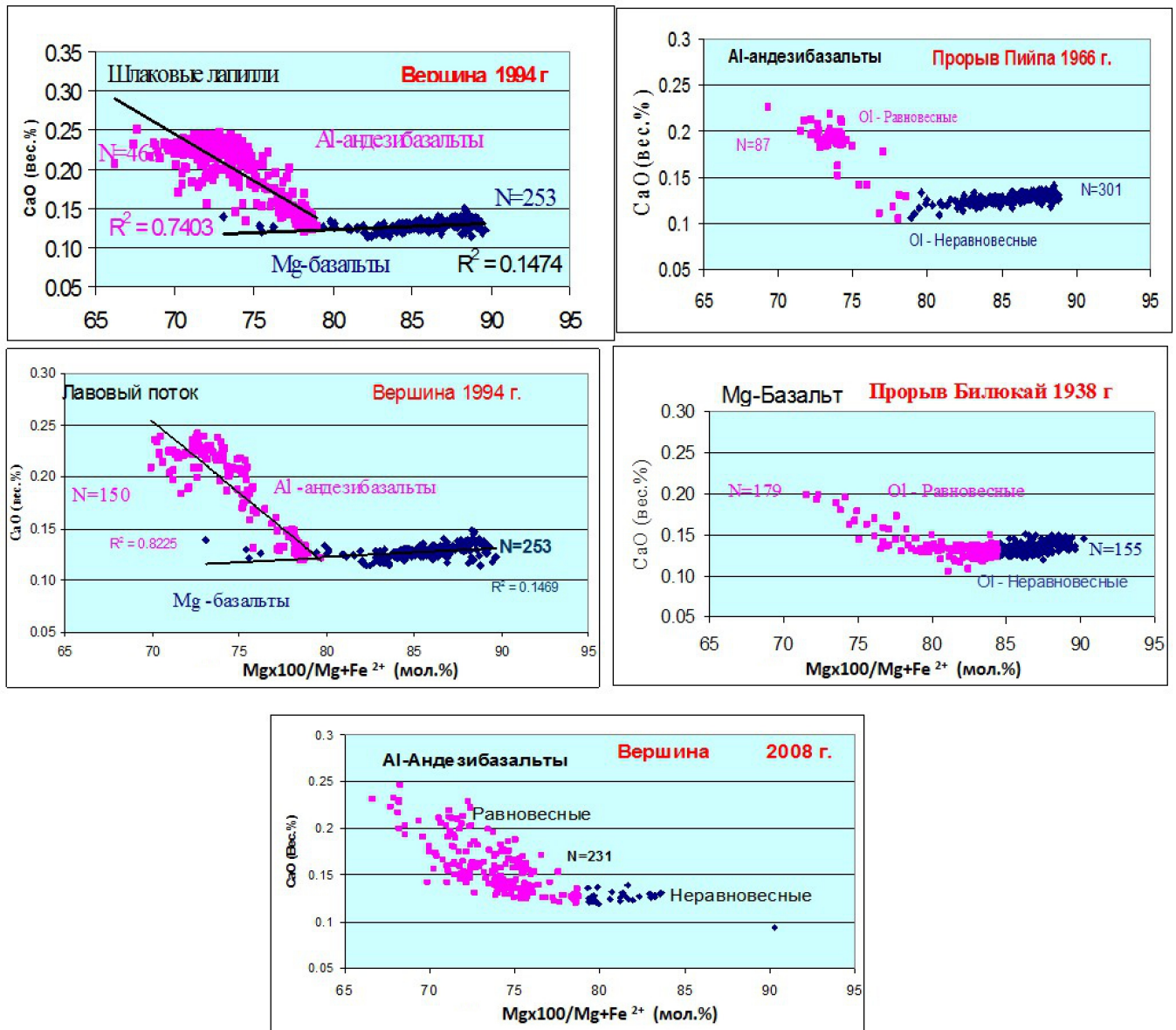


Рис. 6. Зависимость содержания СаО в оливине от его магниальности в магниальных и глинозёмистых базальтах и андезибазальтах вулкана Ключевской. *Примечание:* цвета фигуративных точек соответствуют указанным в условных обозначениях к рис. 5.

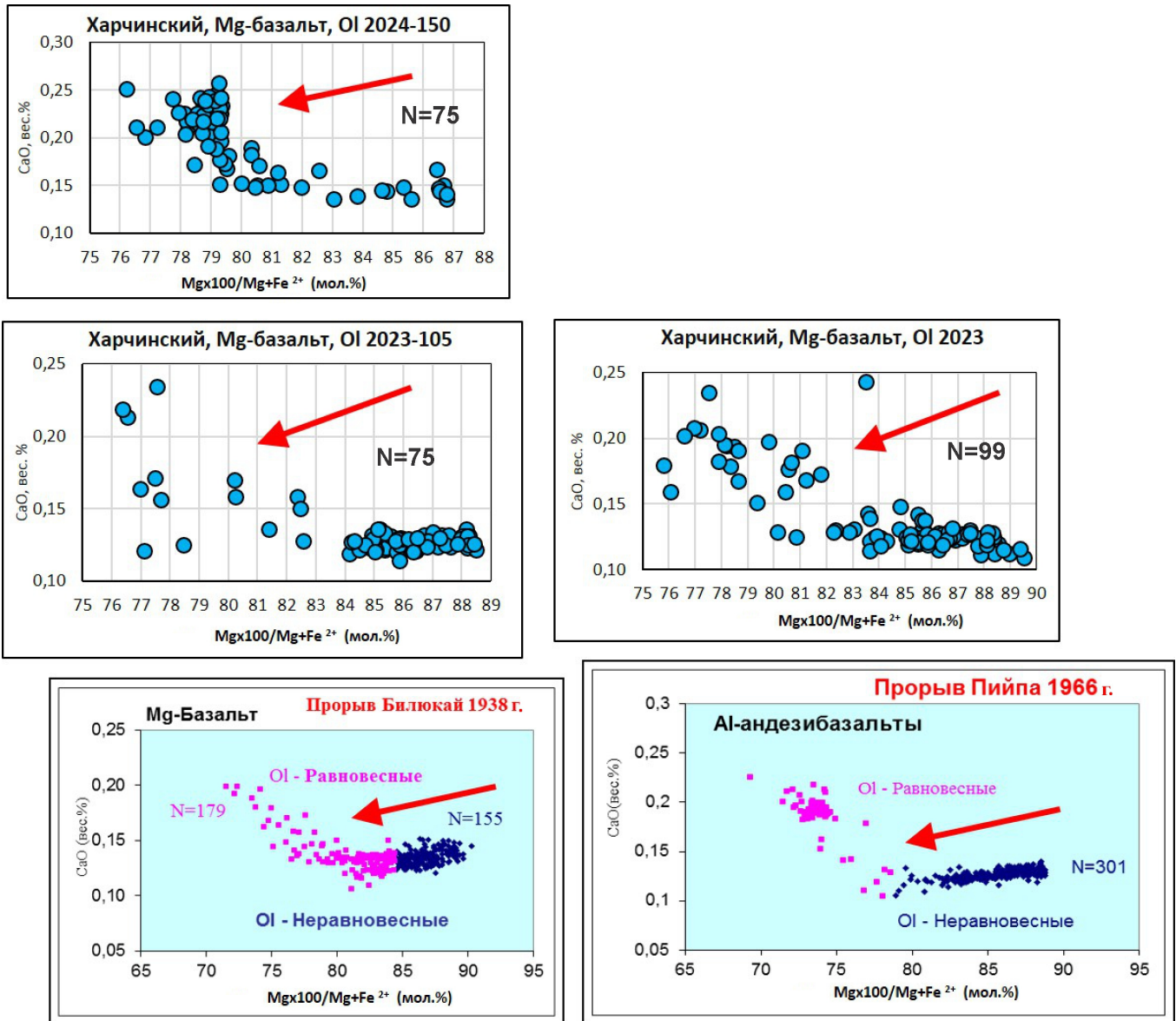


Рис. 7. Составы оливинов высокомагнезиальных, магнезиальных и глинозёмистых базальтов и андезибазальтов вулканов Ключевской и Харчинский. *Примечание:* цвета фигуративных точек соответствуют указанным в условных обозначениях к рис. 5. Неравновесность оливинов по отношению к породе вулкана Харчинского не рассчитывалась.

На единый источник, из которого образовались все рассматриваемые породы, указывают спайдердиаграммы (рис. 8). Хорошо видно, что высокомагнезиальные и глинозёмистые базальты и магнезиальные андезибазальты характеризуются близкой конфигурацией точек всех элементов-примесей. А именно — высокими (избыточными) концентрациями крупноионных литофильных элементов (Ba, Sr) и аномально низкими концентрациями высокозарядных катионов (Ti, Zr, Nb).

Это положение подтверждается тем обстоятельством, что Sr-максимум наблюдается как в высокоглинозёмистых андезибазальтах, так и в самых магнезиальных базальтах.

Это хорошо видно и на спайдердиаграммах высокомагнезиальных и магнезиальных базальтов и андезибазальтов вулкана Харчинский, глинозёмистых плагиобазальтов из геологического разреза вулкана Плоский Толбачик (рис. 9). Здесь, как и в магнезиальных базальтах и андезибазальтах вулкана Ключевской на спайдердиаграмме фиксируются островодужные магматические характеристики: максимумы крупноионных литофильных элементов (Ba, Sr) и аномально низкие концентрации высокозарядных катионов (Ti, Zr, Nb).

Таким образом, Sr-максимум — это региональная метка всех магнезиальных базальтов и их дифференциатов, высокоглинозёмистых и магнезиальных андезибазальтов. Она, наряду с описанными ранее геохимическими особенностями рассматриваемых вулкаников, свидетельствует о едином источнике для всех рассматриваемых магнезиальных вулканических пород.

Согласно данным, приведенным в работе С. А. Хубуная, А. В. Соболева [9], состав исходного расплава отвечает пикритам с высокими содержаниями H_2O (2,2 — 2,9 мас. %). Позднее, высокие содержания H_2O в исходных расплавах Ключевского вулкана были подтверждены работами других исследователей [5]. Мантийный субстрат имеет лерцолит-гарцбургитовый состав. Давления отделения первичного расплава от мантийного вещества оцениваются в 15 — 18 кбар (рис. 10), что соответствует глубине мантийного очага в 45 — 60 км, и хорошо согласуется с геофизическими данными [4, 7]. Температура исходного расплава 1280–1320°С. Обобщая результаты изучения высокомагнезиальных базальтов, магнезиальных и высокоглинозёмистых андезибазальтов трёх вулканов можно констатировать, что, начиная с позднего плейстоцена в районе Ключевской группы вулканов для образования исходных магнезиальных расплавов плавился единый мантийный субстрат с близкой степенью частичного плавления.

12 ноября 2012 г. началось трахиандезибазальтовое извержение на склоне вулкана Плоский Толбачик. Оно началось на 50 м выше (по вертикали) конуса извержения магнезиальных базальтов 1941 г. (рис. 11)

Трахиандезибазальты ТТИ-50 резко отличаются от магнезиальных базальтов вулканов Ключевской, Харчинский и северного прорыва БТТИ по своему минеральному составу. Они преимущественно субафировые и афировые. Оливин и клинопироксен в субфенокристаллах — редкость, преобладает основной плагиоклаз. Иногда вкрапленники плагиоклаза достигают значительных размеров — до 10 мм (рис. 12). Они, как правило, зональны, нередко резорбированы стеклом. Петрографический анализ свидетельствует о кристаллизации плагиоклаза на ликвидусе субщелочного расплава.

В высокоглинозёмистом субщелочном расплаве были широко распространены процессы фракционной кристаллизации, что хорошо отражается на спайдердиаграмме (рис. 13). Здесь мы видим глубокий Sr-минимум. Такое распределение элементов-примесей хорошо объясняется геохимическими связями — концентрацией Sr в плагиоклазах. В этом мантийном расплаве на ликвидусе в промежуточных магматических очагах, вероятно, кристаллизовался Pl. Фенокристаллы Pl аккумуляровались на дне магматической камеры и образовывали плагиоклазовые кумулаты. Таким образом, расплав в апикальной части камеры обеднялся Sr. Это мы и наблюдаем на спайдердиаграммах трахибазальтов ТТИ-50.

Подтверждением высказанного положения служат крупные фенокристаллы Pl в трахибазальтах — мегаплагиофировые базальты, многочисленные крупные плагиоклазовые кристаллолапилли и кумулятивные плагиоклазовые породы. Они встречаются исключительно при извержениях трахибазальтов и их дифференциатов — трахиандезибазальтов. Кроме того, они выбрасываются в виде ксенолитов в вулканических бомбах магнезиальных базальтов (Северный прорыв БТТИ).

Сравнивая спайдердиаграммы рассматриваемых пород можно констатировать следующее: для высокомагнезиальных, магнезиальных, глинозёмистых базальтов и андезибазальтов вулканов Ключевской, Харчинский, Плоский Толбачик отмечается близкое сходство в распределении элементов-примесей, наиболее вероятно обусловленное их генерацией из одного мантийного субстрата (рис. 14).

Несмотря на общность характера распределения большинства элементов-примесей во всех изучаемых породах, вследствие их формирования в островодужных условиях, есть и существенные различия между субщелочными и известково-щелочными вулканиками. Для трахиандезибазальтов ТТИ-50 характерно стабильно повышенное (относительно известково-щелочных) содержание всех элементов-примесей, в т. ч. Rb, Ti, Zr, Hf, пониженное — Sr (аккумуляция плагиоклаза в магматической камере). Это наиболее вероятно свидетельствует о разных источниках исходных расплавов для известково-щелочных и субщелочных магм. Принимая во внимание близость расположения объектов исследования

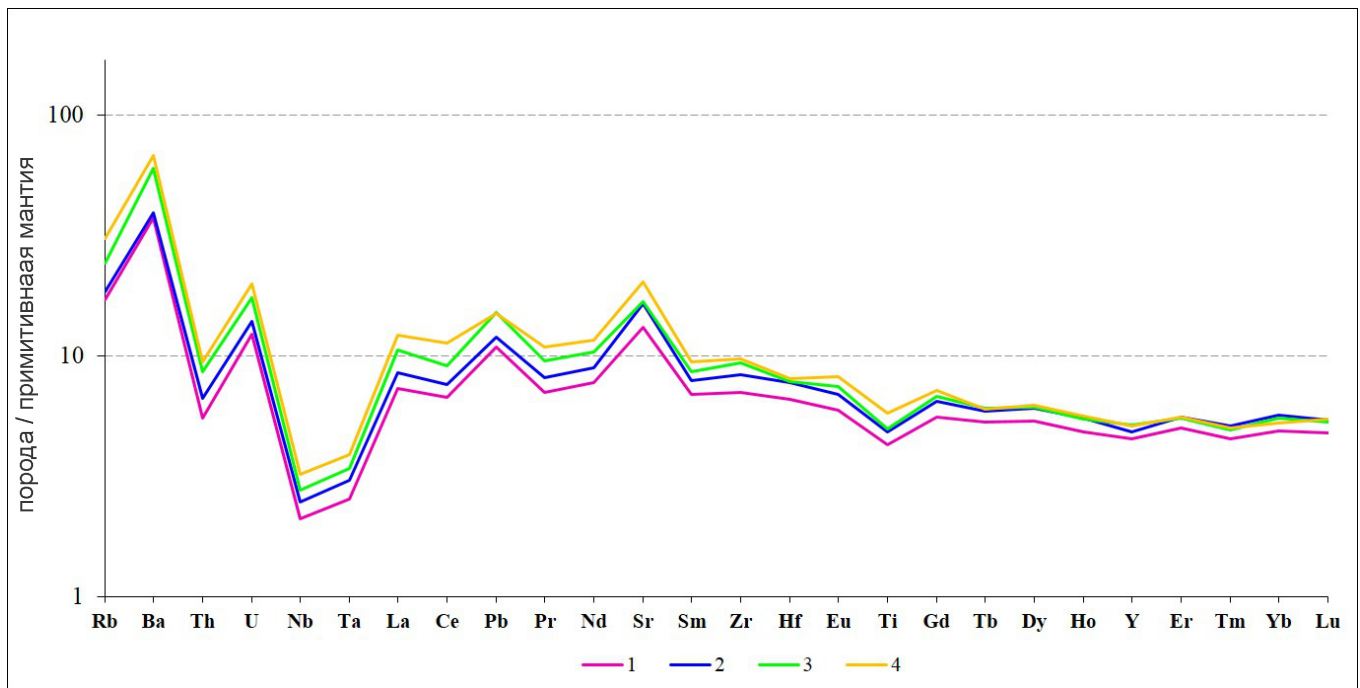


Рис. 8. Спайдердиаграммы высокомагнезиальных, магнезиальных и глинозёмистых базальтов и андезибазальтов вулкана Ключевской. Условные обозначения: 1 — базальт, бомбовое поле Лучицкого (MgO 11,0%); 2 — андезибазальт, конус Цирк (MgO 7,5%); 3 — андезибазальт, лавовый поток Белянкина (MgO 6,0%); 4 — андезибазальт, лавовый поток Заварицкого (MgO 4,9%)

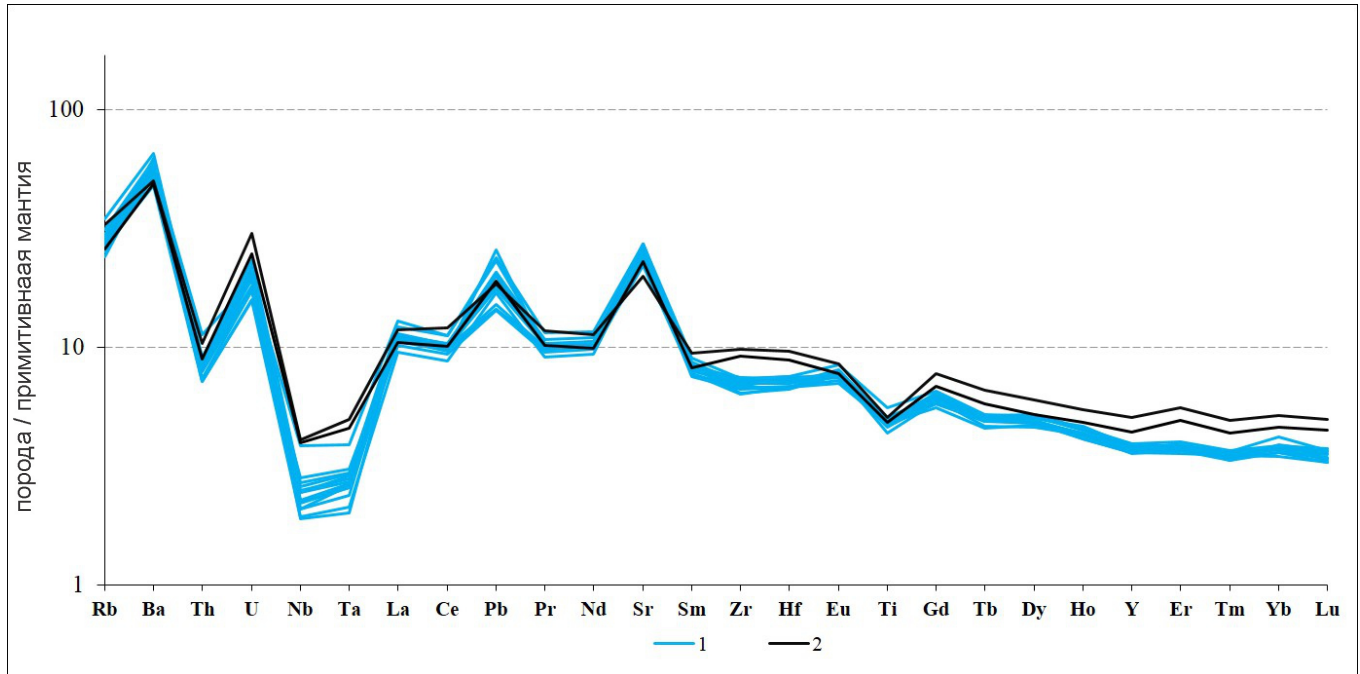


Рис. 9. Спайдердиаграммы высокомагнезиальных базальтов и магнезиальных андезибазальтов вулканов Харчинский и Плоский Толбачик. Условные обозначения: 1 — высокомагнезиальные и магнезиальные базальты, андезибазальты вулкана Харчинский; 2 — глинозёмистые плагиобазальты из геологического разреза вулкана Плоский Толбачик

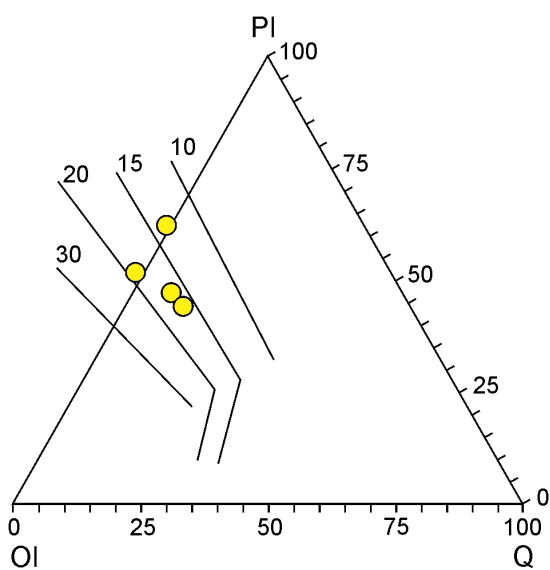


Рис. 10. Диаграмма оценок давлений образования исходных пикритовых расплавов вулкана Ключевской на проекции системы оливин (OI) – плагиоклаз (P1) – кремнекислота (Q) – кальциевый пироксен (Di) из вершины Di. Изобары равновесия с лерцолитовым веществом показаны для водосодержащих систем с содержанием H_2O в расплаве 2–3 мас. % [10, 13]. Цифрами показаны давления, кбар; значками – составы исходных расплавов: 1, 2, 3, 4 – побочные прорывы магнезиальных базальтов соответственно Булочка, Цирк, Билукай, Слюнина.

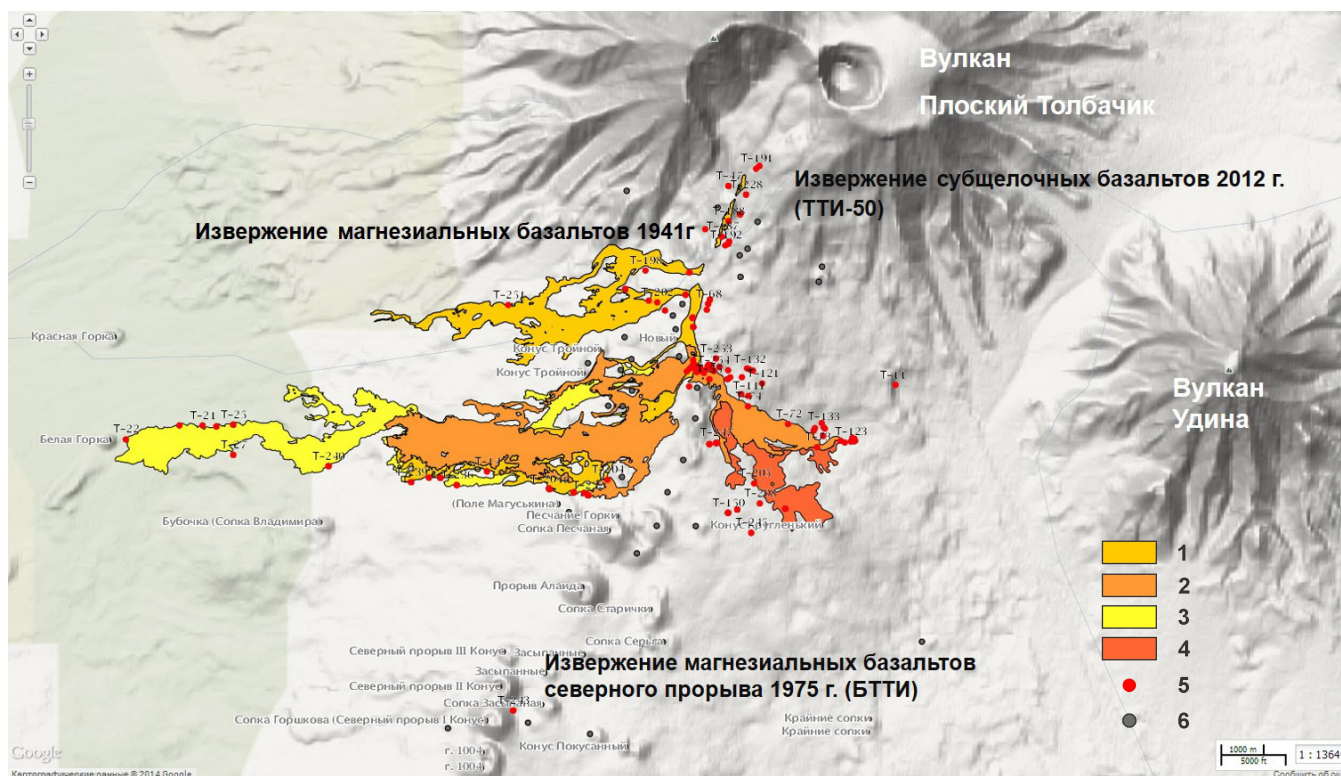


Рис. 11. Схема расположения центров извержений магнезиальных базальтов и трахиандезибазальтов в районе вулкана Плоский Толбачик. Условные обозначения: ориентировочное время начала формирования лавовых потоков: 1 – 27.11.2012; 2 – 14.02.2012; 3 – 13.12.2012; 4 – 13.03.2013; 5 – точки отбора образцов; 6 – шлаковые конусы. Схема составлена И. М. Романовой.

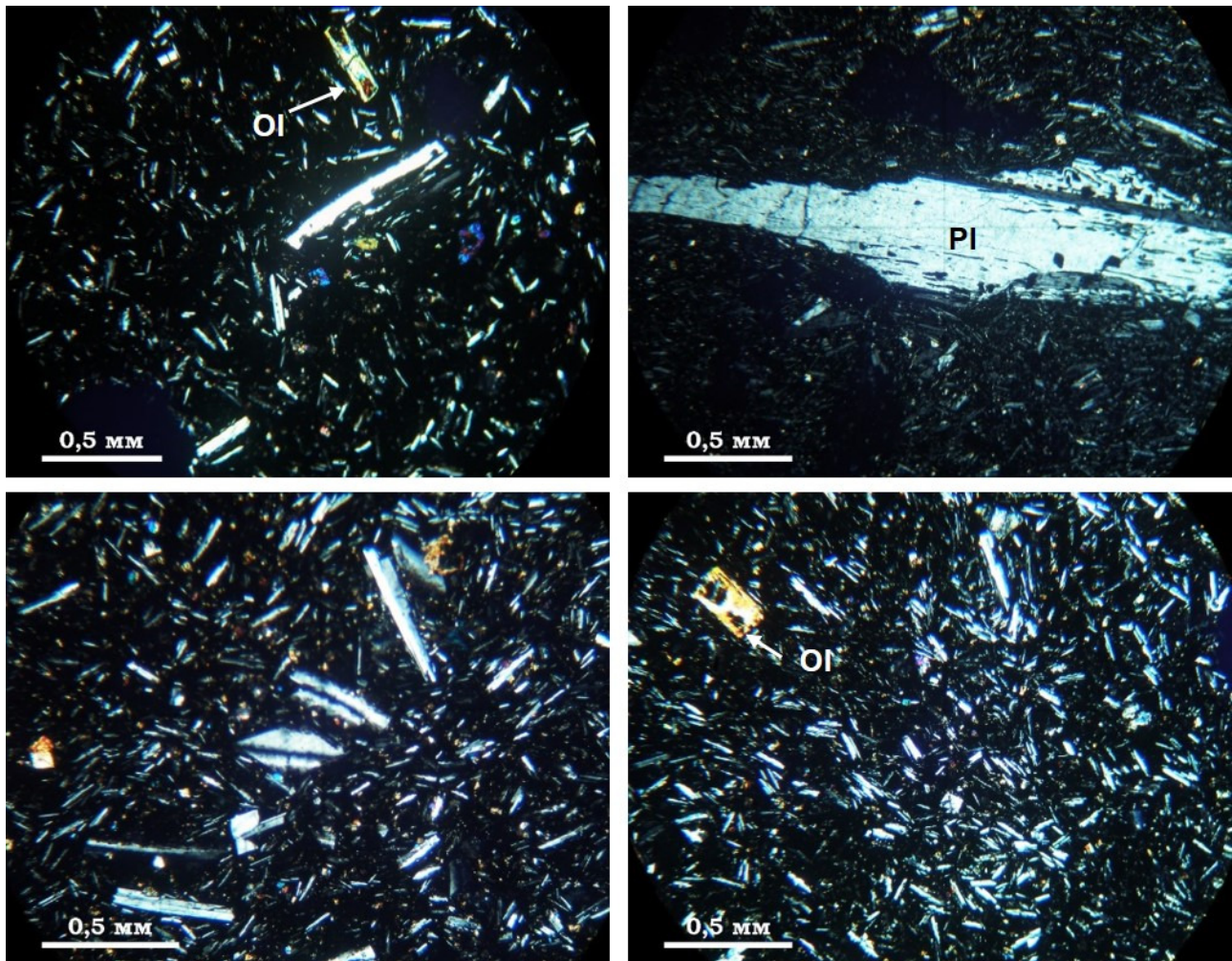


Рис. 12. Микрофотографии трахиандезитбазальтов ТТИ-50.

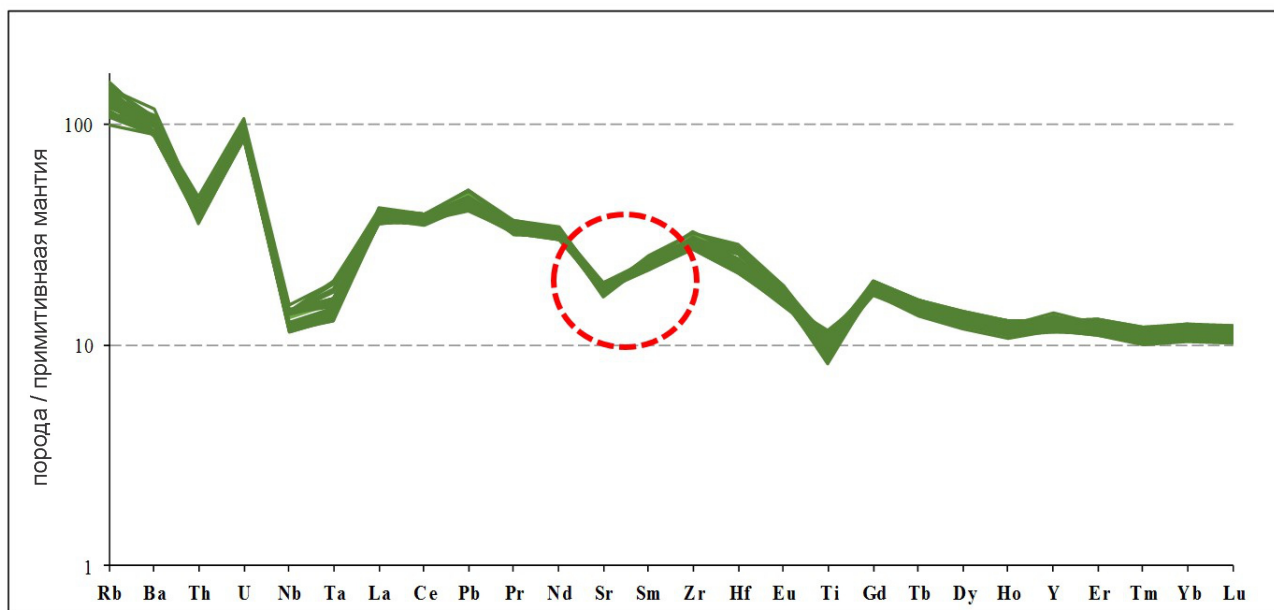


Рис. 13. Спайдердиаграмма трахиандезитбазальтов ТТИ-50. *Примечание:* красная пунктирная линия подчёркивает Sr-минимум во всех трахиандезитбазальтах побочного извержения вулкана Плоский Толбачик (ТТИ-50)

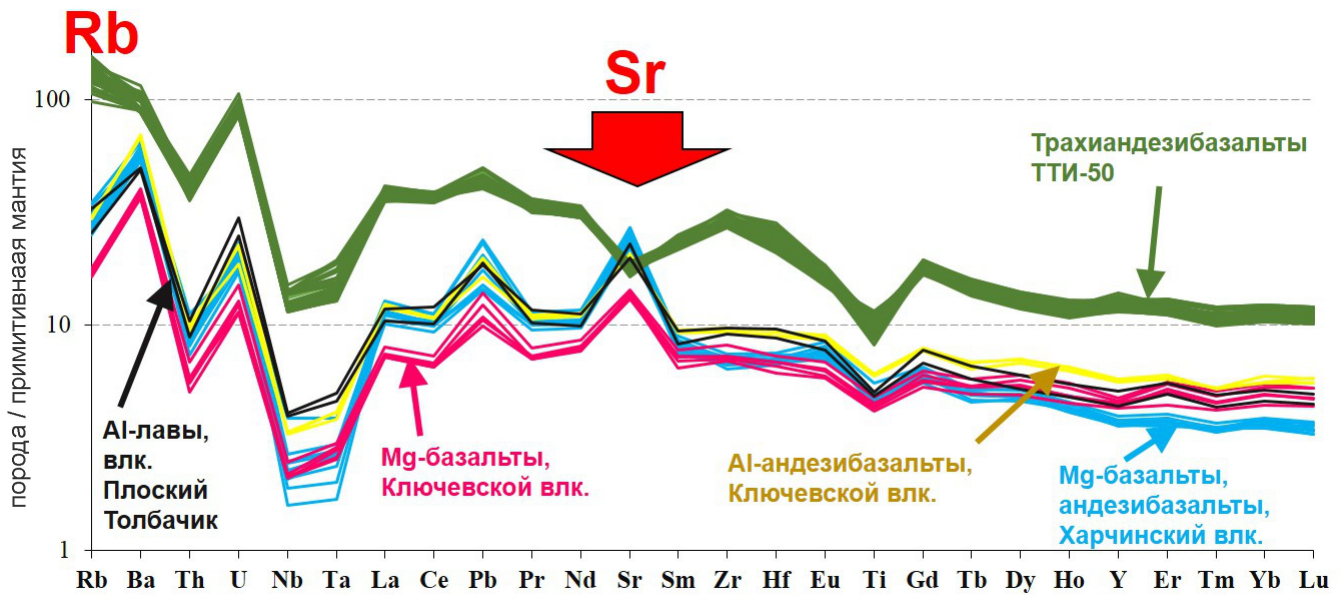


Рис. 14. Спайдердиаграммы высокомагнезиальных, магнезиальных, глинозёмистых базальтов и андезибазальтов и трахиандезибазальтов (ТТИ-50) вулканов Харчинский, Ключевской, Плоский Толбачик.

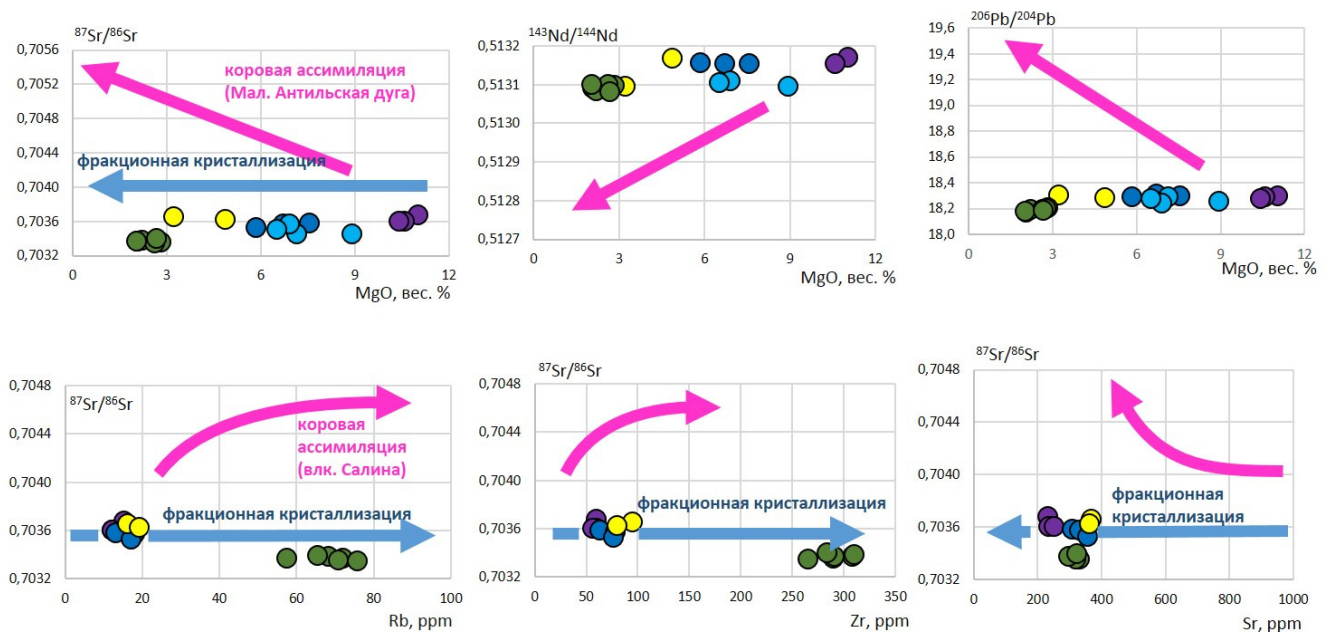


Рис. 15. Изотопные характеристики базальтов, андезибазальтов района Ключевской группы вулканов. Условные обозначения: фигуративные точки: фиолетовые, синие, жёлтые — соответственно высокомагнезиальные базальты, магнезиальные андезибазальты, глинозёмистые андезибазальты вулкана Ключевской; зелёные — трахиандезибазальты (ТТИ-50); голубые — магнезиальные базальты и андезибазальты вулкана Харчинский. Линии фракционной кристаллизации (голубой цвет), коровой ассимиляции (розовый цвет) взяты из работы [1].

и почти одновременное (по геологическим меркам) формирование изучаемых пород можно предположить, вертикальную гетерогенность мантийных источников, поставивших исходные расплавы.

Наиболее важной характеристикой источника магм является соотношение радиогенных изотопов, так как оно мало меняется в процессе плавления и последующих процессах в магматической камере. Изотопные отношения также позволяют оценивать влияние коры на магматический расплав.

На диаграммах представлены магнезиальные базальты и андезибазальты Харчинского вулкана, магнезиальные и глинозёмистые базальты и андезибазальты Ключевского вулкана, трахиандезибазальты ТТИ-50 (рис. 15). По соотношениям радиогенных изотопов все породы относятся к мантийным образованиям. Хорошо видно, что высокомагнезиальные базальты, магнезиальные и глинозёмистые андезибазальты вулкана Ключевской лежат на линии фракционной кристаллизации, так же, как и андезиты вулкана Безымянный [1].

Выводы

В районе Ключевской группы вулканов, в разное время извергались продукты магнезиальных и субщелочных магм, которые кристаллизовались в независимых промежуточных магматических очагах.

Значительные объёмы продуктов вулканических, извержений, их продолжительность, минералогические и геохимические особенности базальтовой магмы разной щёлочности указывают на процессы фракционной кристаллизации протекающие в промежуточных магматических очагах.

Одинаковые петрографические особенности, сходное поведение в распределении главных, редких и редкоземельных элементов в минералах и породах известково-щелочной серии и разнородность таковых субщелочной серии в течение всего периода кристаллизации от ликвидуса к солидусу свидетельствует о разном генезисе сравниваемых продуктов вулканической деятельности.

В рамках современных геохимических представлений продукты магнезиальных и субщелочных мантийных выплавов независимы. Их невозможно получить друг из друга в результате фракционной кристаллизации. Каждый из этих исходных магматических расплавов имеет свою короткую дифференцированную серию.

Изотопно-геохимический анализ магнезиальных и субщелочных пород свидетельствует об их принадлежности к мантийным выплавкам без какого-либо влияния земной коры.

Извержения этих мантийных магматических продуктов в непосредственной близости друга от друга на поверхности, в одной точке (вулкан Плоский Толбачик: ТТИ-50 и извержение 1941 г.) и в одно и то же время (Северный и Южный прорывы БТТИ) не позволяют предполагать их генезис в результате плавления одних и тех же горизонтов мантии.

Эти извержения свидетельствуют о разноглубинных мантийных выплавках разной щёлочности, и, как следствие, о вертикальной гетерогенности мантии в районе Ключевской группы вулканов.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 13-05-12090.

Авторы выражают благодарность зав. лабораторией динамической вулканологии, д. г.-м. н. Ивану Васильевичу Мелекесцеву, старшему научному сотруднику Александру Павловичу Максимову, старшему научному сотруднику, к. г.-м. н. Глебу Борисовичу Флёрову, за предоставленные образцы.

Эта работа была бы невозможна без активного участия инженеров научного музея вулканологии: Ирины Леонидовны Ототюк, Веры Вадимовны Пантिलеевой, ведущего программиста ВЦ Ираиды Мстиславовны Романовой и старшего инженера фотолaborатории ИВиС ДВО РАН Александра Васильевича Сокоренко.

Список литературы

1. *Альмеев Р. Р.* Геохимия магматизма вулкана Безымянный: признаки мантийного источника и условия фракционирования исходной магмы. Автореф. канд. дисс. Москва, 2006. 25 с.
2. *Арискин А. А., Бармина Г. С., Озеров А. Ю., Нильсен Р. Л.* Генезис высокоглинозёмистых базальтов Ключевского вулкана // *Петрология*. 1995. Том. 3. № 5. С. 496–521.
3. *Вольнец О. Н., Мелекесцев И. В., Пономарева В. В., Ягодзински Дж. М.* Харчинский и Заречный вулканы — уникальные центры позднеплейстоценовых магнезиальных базальтов на Камчатке: структурная приуроченность, морфология, возраст и геологическое строение вулканов // *Вулканология и сейсмология*. 1998. № 4-5. С. 5–18.
4. *Горшков Г. С.* О глубине магматического очага Ключевского вулкана // *ДАН*. 1956. Т. 106. №4. С. 703–705
5. *Миронов Н. Л., М. В. Портнягин.* Содержания H₂O и CO₂ в исходных магмах Ключевского вулкана по данным изучения расплавных и флюидных включений в оливине. // *Геология и геофизика*, 2011, т. 52. № 11. С. 1718–1735.
6. *Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования.* СПб: Изд. ВСЕГЕИ, 2010.
7. *Хубуня 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.
8. *Хубуня 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.
9. *Хубуня С. А., Соболев А. В.* Первичные расплавы известково-щелочных магнезиальных базальтов Ключевского вулкана (Камчатка) // *ДАН*. 1998. Т. 360. №1. С. 100–102.
10. *Danyushevsky L. V., Green D. H., Falloon T. J., Sobolev A. V.* // *Miner. Mag.* 1994. V. 58A. P. 209–210.

11. *Jakes P., Gill J.B.* Rare earth elements and the island arc tholeiitic series // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1970. V. 9.
12. *Jakes P., White A. J. R.* Major and trace element abundances in volcanic rocks orogenic areas // *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1972. V. 83. N. 1. P. 29-40.
13. *Sobolev A.V., Danyushevsky L.V.* Petrology and geochemistry of boninites from the termination of the Tonga Trench: Constrains on the generation conditions of primary high-Ca boninite magmas // *J. Petrol.* V. 35. P. 1183-1211.