

КРЕМНЕКИСЛЫЙ ВУЛКАНИЗМ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК (НА ПРИМЕРЕ ОРОГЕННЫХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОЯСОВ АЗИИ)

© 2018 г. А. М. Курчавов

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ),
119017, Москва, Старомонетный переулок, 35, e-mail: petrocom@igem.ru*

Поступила в редакцию 10.07.2017 г., принята к печати 02.10.2017 г.

Кремнекислый вулканизм (кремнекислыми считаются породы с содержанием кремнезема более 64 мас. %) наиболее широко представлен в орогенных вулканических поясах (окраинно-континентальных и коллизионных) и в энсиалических островных дугах (на континентальной стадии их развития). На ранней стадии формирования этих структур кремнекислые вулканиды входят в состав последовательно дифференцированных базальт-андезит-дацит-риолитовых формаций, на поздней стадии они составляют бимодальные (контрастные по кремнезему) формации повышенной щелочности. Расцвет кремнекислого вулканизма приходится на среднеорогенную стадию в виде риолит-риодацитовых извержений, часто в форме игнимбритов. В породах разных стадий наблюдаются вариации содержания калия и натрия. Наиболее выдержаны по соотношению калия и натрия среднеорогенные кремнекислые вулканиды, в то время как ранние и особенно позднеорогенные породы широко варьируют по этим параметрам. В целом кремнекислые вулканиды орогенных поясов более щелочные и калиевые, чем породы энсиалических островных дуг. Вкрест простирания орогенных поясов существенно меняются петрохимические особенности вулканидов. Во фронтальных зонах преобладают породы низкокалиевой ветви известково-щелочной петрохимической серии, в тыловых зонах развиты породы высококалиевой ветви этой серии и шшонит-латитовой петрохимической серии. Появление кремнекислых вулканидов в большом объеме и повышенная их щелочность коррелируют со зрелостью континентальной коры, при суммарном воздействии на гранитно-метаморфический слой тепла более глубокой базальтовой магмы, трансмагматических флюидов и ремобилизованных “коровых” летучих компонентов.

Ключевые слова: кремнекислый вулканизм, орогенные вулканические пояса, зональность вулканизма, геотектонические обстановки

ACID VOLCANISM OF VARIOUS GEOTECTONIC SITUATIONS (ON THE EXAMPLE OF OROGENIC VOLCANIC BELTS IN ASIA)

Anatoly M. Kurchavov

*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of RAS (IGEM),
35 Staromonetny per., Moscow, 119017, Russia, e-mail: petrocom@igem.ru*

Received 10.07.2017, accepted 02.10.2017

Acid volcanism (rocks with silica more than 64 wt%) is the most widely represented in the orogenic volcanic belts (continental margin and collisional) and ensialic island arcs on the continental stage in their development. At an early stage of formation of these structures acid volcanics are part of differentiated series basalt-andesite-dacite-rhyolite formation, at a later stage they form bimodal (contrasting silica) formation of high alkalinity. The heyday of acid volcanism coincides with middle-orogenic stage as rhyolite-rhyodacitic eruptions, often in the form of ignimbrites. Variations of the content of potassium and sodium in rocks are changing in different stages. The most constant ratio of potassium and sodium are characterize for middle-orogenic volcanics while early and especially later-orogenic volcanic rocks vary widely in content of these parameters. In general, the acid volcanic orogenic belts more alkaline and potassium than rock ensialic island arcs, except sometimes occur at the front of orogenic belts of small island- structures ultrapotassic rhyolites. Petrochemical peculiarities of volcanics vary considerably across the strike of orogenic belts. Low-potassium branch of calc-alkaline series dominated in the frontal zones, the rocks of high-K branches of this series as far as shoshonite-latite petrochemical series developed in the rear areas of orogenic belts. The emergence of acid volcanic rocks in a large volume and their

Для цитирования: Курчавов А.М. (2018) Кремнекислый вулканизм различных геотектонических обстановок (на примере орогенных вулканических поясов Азии). *Литосфера*, **18**(3), 327–340. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-3-327-340

For citation: Kurchavov A.M. (2018) Acid volcanism of various geotectonic situations (on the example of orogenic volcanic belts in Asia). *Litosfera*, **18**(3), 327–340. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-3-327-340

alkalinity correlated with the maturity of the continental crust, with an overall impact on the granite-metamorphic layer heat a deep basaltic magma, transmagmatic fluids and reomobilized of "crust" volatile components.

Keywords: acid vulcanism, volcanic orogenic belt, zoning vulcanism, geotectonic environment

Acknowledgements

The studies were carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (projects 08-05-00423 and 14-05-00728), the programs of fundamental research of the Presidium of the Russian Academy of Sciences (programs No. 4-2010-2014, No. 18-2015 and No. 15-2016) and basic subjects of IGEM RAS (1.15 II).

ВВЕДЕНИЕ

Кремнекислый вулканизм (содержание оксида кремния в породах свыше 64 мас. %) проявляется на разных стадиях эволюции подвижных поясов и в различных геотектонических обстановках, однако расцвет данного вулканизма связан с континентальной стадией их развития. В это время формируются орогенные вулканические пояса. Под орогенным понимается континентальная стадия становления складчатых поясов в условиях горного расчлененного рельефа. Соответственно, образуемые в этот этап линейно вытянутые ареалы континентальных вулканических рассматриваются как оро-

генные вулканические пояса, которые ассоциируются с молассами [Херасков, 1967; Тектоника..., 1980]. Примером орогенных вулканических поясов являются девонские и верхнепалеозойские наземные вулканы Центрально-Азиатского складчатого пояса, мезозойско-кайнозойские вулканы Западно-Тихоокеанского обрамления (Охотско-Чукотский, Восточно-Сихотэ-Алинский пояса и др.), кайнозойские вулканы Альпийского пояса и др. (рис. 1). Одни из них располагаются на краю ранее стабилизированных областей по границе с подвижными областями (окраинно-континентальные или надсубдукционные вулканические пояса). Другие формируются после коллизии складчатого поя-

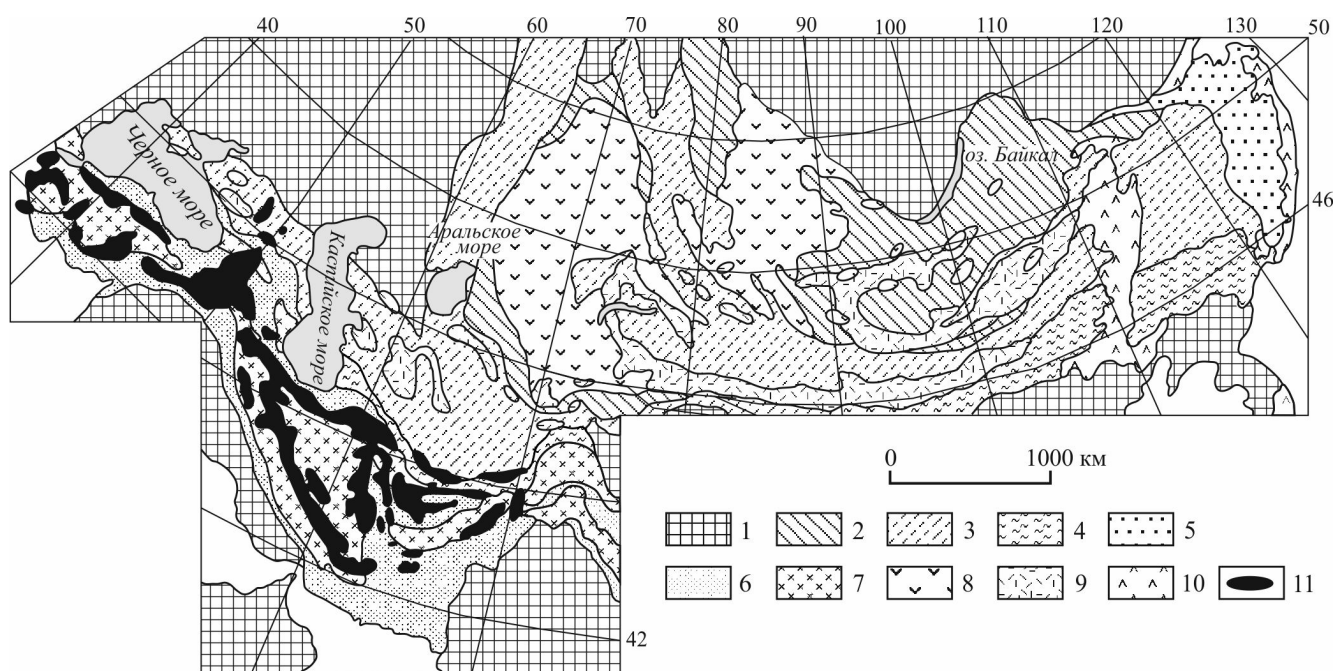


Рис. 1. Орогенные вулканические пояса Азии.

1–6 – области континентальной коры, сформированной: 1 – к началу палеозоя, 2 – к девону, 3 – к среднему карбону, 4 – к среднему триасу, 5 – к позднему мелу, 6 – к позднему миоцену; 7 – фрагменты древней континентальной коры в составе позднемиоценовой; 8–11 – орогенные вулканические пояса: 8 – девонские, 9 – позднепалеозойские, 10 – мезозойско-кайнозойские, 11 – кайнозойские.

Fig. 1. Orogenic volcanic belts of Eurasia.

1–6 – continental crust consolidated: 1 – by Early Paleozoic, 2 – by Devonian, 3 – by Middle Carboniferous, 4 – by Middle Triassic, 5 – by Late Cretaceous, 6 – by Late Miocene; 7 – fragments of older continental crust enclosed in crust of Late Miocene consolidation; 8–11 – orogenic volcanic belts of different ages: 8 – Devonian, 9 – Late Paleozoic, 10 – Mesozoic-Cenozoic, 11 – Cenozoic.

са (коллизийные вулканические пояса, переходящие во внутриплитные). Также широко проявлены наземные кремнекислые вулканы в энсиалических островодужных системах, на континентальной стадии их развития. Во всех случаях вулканы меняют свои петрохимические характеристики вкост простирания структур, формируя зональность разного типа.

В предлагаемой статье на основе выявленных типов зональности орогенных вулканических поясов анализируются возможные причины возникновения больших объемов кремнекислого вулканизма и связи различной щелочности и кремнекислотности пород по латерали и вертикали с особенностями геотектонического положения ареалов вулканизма.

Выявление отличительных особенностей кремнекислых вулканитов различных геотектонических ситуаций важно для диагностики их палеоаналогов, познания процессов магмогенерации, понимания тектоно-магматических особенностей формирования геологических структур и закономерностей размещения полезных ископаемых в их пределах.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В основу исследований положено прослеживание по латерали изменений сериальных петрохимических особенностей магматических образований, что было детально проведено для девонских орогенных магматитов всего ареала их распространения в Центральном Казахстане [Курчавов и др., 2000]. С этой целью использовалась TAS-диаграмма, верхняя часть которой представляет собой классификационную диаграмму “Петрографического кодекса”, дополненную вниз по содержанию оксида калия (рис. 2). На диаграмме выделены поля развития петрохимических серий: толеитовой, известково-щелочной (низкокальциевой и высококальциевой ветвей), шохонитовой. Выявленные в конкретных массивах петрохимические типы пород (по содержанию щелочей и их петрохимической сериальной принадлежности) наносились условными знаками на геологическую основу с конкретными контурами распространения ареалов развития ранней, средней и поздней стадий девонского орогенного магматизма. Было использовано более 6000 анализов пород, достаточно равномерно распределенных по площади. Это позволило составить карты (масштаб 1 : 1 000 000) распространения формаций пород, выделенных по кремнезему (последовательно дифференцированные, контрастные, монопородные), с учетом щелочности пород и их сериальной петрохимической принадлежности (по калию). В дальнейшем по данной методике были проанализированы особенности латерального изменения сериальной петрохимической специфики пород других вулканических поясов Азии [Курчавов и др., 1999].

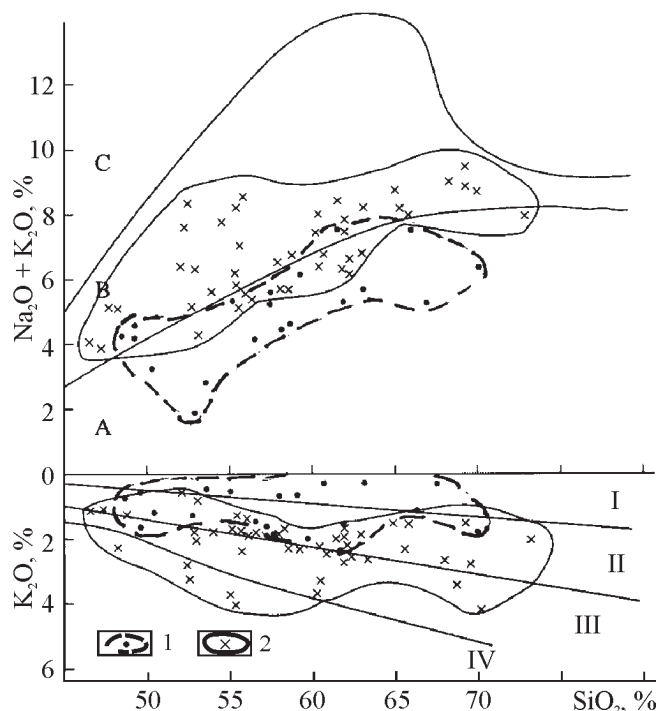


Рис. 2. Изменение содержания щелочей в нижнедевонских вулканических породах фронтальной и тыловой зон на северо-востоке Центрального Казахстана.

1 – фронтальная зона по Р.А. Борукаеву и Т.Д. Далабаеву (лист N 43–124-Г), 2 – тыловая зона по М.Д. Трифан (листы М-43–1-А, Г; 2-А; 13-Б); А, В, С – поля распространения петрохимических серий (по общей щелочности): А – известково-щелочная, В – субщелочная, С – щелочная [Курчавов и др., 1999]; I–IV – петрохимические серии (по содержанию K_2O): I – толеитовая, II, III – известково-щелочная низкокальциевая (II) и высококальциевая (III); IV – шохонитовая.

Fig. 2. Variations of the alkali content in the Lower Devonian volcanic rocks of the frontal and back zones of the marginal continental belt in northeastern Central Kazakhstan.

1 – frontal zone, after R.A. Borukaev and T.D. Dalabaev (Sheet N-43-124-G); 2 – back zone, after M.D. Trifan (Sheets M-43-1-A, G; 2-A; 13-B); A, B, C – fields of normal calc-alkaline (A), subalkaline (B), and alkaline (C) rocks, [Kurchavov et al., 1999]; I–IV – petrochemical series: I – tholeiitic, II, III – calc-alkaline with low (II) and elevated (III) potassium contents, IV – shoshonitic.

ХРОНОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ КРЕМНЕКИСЛОГО ВУЛКАНИЗМА В ОРОГЕННЫХ ПОЯСАХ АЗИИ

Для всех указанных вулканических поясов характерна сходная стадийность развития вулканизма (табл. 1, рис. 3–5). На ранней стадии развития орогенных поясов кремнекислые вулканы входят в состав последовательно дифференцированных базальт-андезит-дацит-риолитовых формаций. К концу стадии роль кремнекислых пород возрастает. На позднеорогенной стадии развития кремне-

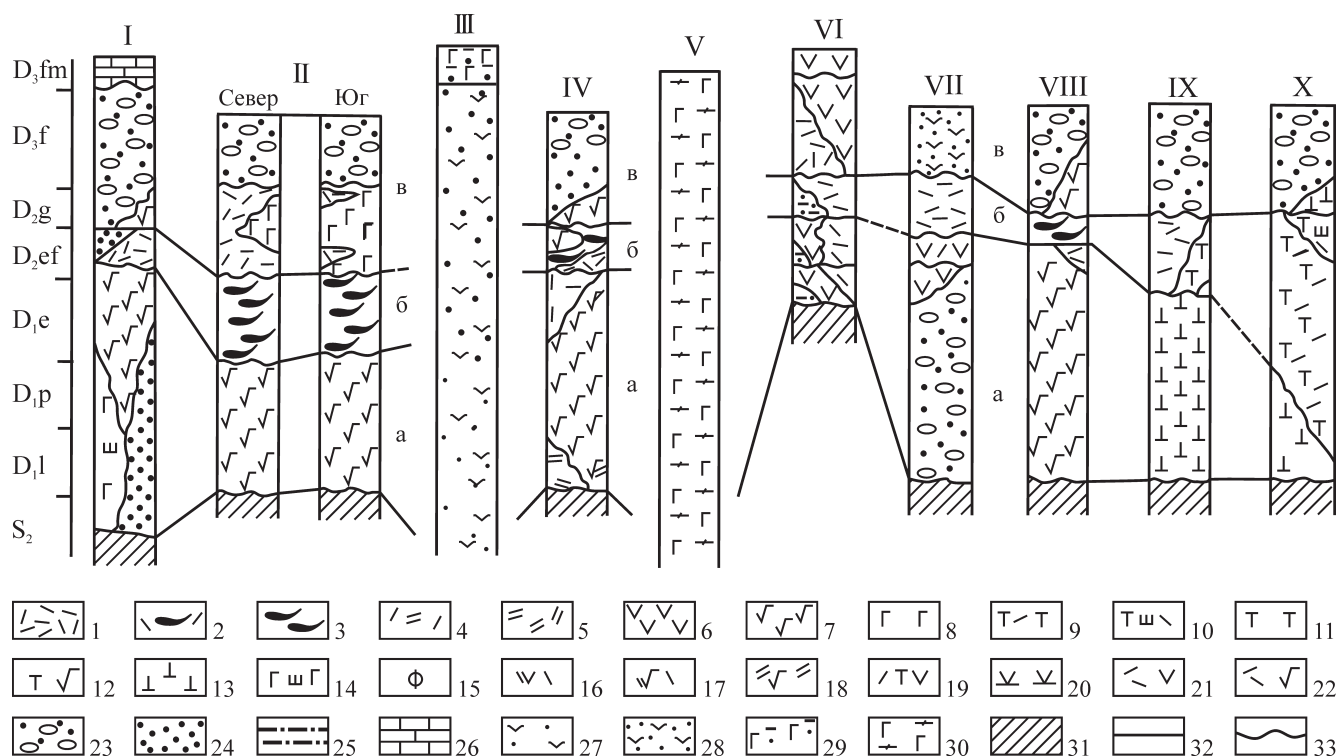


Рис. 3. Формационные ряды девонских орогенных вулканических поясов.

I – Кокчетавское поднятие, II – Северо-Восточный (Карагандинско-Ащисуйский) сегмент Центрального Казахстана, III – Джунгаро-Балхашское окраинное море, IV – Чингиз и Тарбагатай, V – Иртыш-Зайсанский субокеанический бассейн, VI – Рудный Алтай, VII – Ануйско-Чуйский прогиб Горного Алтая, VIII – Северо-Западная Монголия, IX – Северо-Минусинская впадина, X – Агульская впадина. Орогенные стадии: а – ранняя, б – средняя, в – поздняя. 1–24 – континентальные формации: 1–22 – вулканогенные (1 – риолитовая, 2 – риолитовая с подчиненными игнимбритами, 3 – риолитовая игнимбритовая, 4 – риодацитовая, 5 – дацитовая, 6 – андезитовая, 7 – базальт-андезитовая, 8 – базальтовая, 9 – риолит-трахириолитовая, 10 – трахириолит-щелочнориолитовая, 11 – трахитовая, 12 – трахиандезит-базальтовая, 13 – трахибазальт-базальтовая, 14 – щелочнобазальтовая, 15 – фонолитовая, 16 – контрастная андезит-риолитовая, 17 – контрастная андезит-базальт-риолитовая, 18 – последовательно дифференцированная андезит-базальт-андезит-риолитовая, 19 – контрастная трахиандезит-трахириолитовая, 20 – бимодальная трахибазальт-трахириолитовая, 21 – последовательно дифференцированная андезит-дацит-риолитовая, 22 – последовательно дифференцированная (базальт)-андезит-базальт-андезит-дацит-риолитовая); 23, 24 – терригенные формации (моласса) (23 – грубообломочная, 24 – тонкообломочная); 25–30 – морские формации (25 – терригенно-известковистая, 26 – известковистая, 27 – известковисто-терригенная, 28 – терригенно-известковистая с подчиненными вулканитами, 29 – терригенно-известковистая с базальтоидами, 30 – кремнисто-базальтоидная с известняками); 31 – доорогенное основание; 32, 33 – стратиграфические границы (32 – согласные, 33 – несогласные).

Fig. 3. Formation series of Devonian orogenic volcanic belts.

I – Kokchetav uplift, II – northeastern (Karaganda-Ashchisu) segment of Central Kazakhstan, III – Jonggar-Balkhash border sea, IV – Chinghiz and Tarbagatai, V – Irtysh-Zaisan ocean, VI – Rudny Altai, VII – Anui-Chuya basin in Gorny Altai, VIII – northwestern Mongolia, IX – northern Minus basin, X – Agul basin. Orogenic stages: a – early, b – middle, c – late. 1–24 – continental assemblages: 1–22 – volcanics of various compositions (1 – rhyolite, 2 – rhyolite with subordinate ignimbrite, 3 – rhyolite ignimbrite, 4 – rhyodacite, 5 – dacite, 6 – andesite, 7 – basalt and andesite, 8 – basalt, 9 – rhyolite-trachyrhyolite, 10 – trachyrhyolite-alkali rhyolite, 11 – trachyte, 12 – trachybasaltic andesite-basalt, 13 – trachybasalt-basalt, 14 – alkali basalt, 15 – phonolite, 16 – contrasting andesite-rhyolite, 17 – contrasting basaltic andesite-rhyolite, 18 – successively differentiated basaltic andesite-andesite-rhyolite, 19 – contrasting trachyandesite-trachyrhyolite, 20 – bimodal trachybasalt-trachyrhyolite, 21 – successively differentiated andesite-dacite-rhyolite, 22 – successively differentiated (basalt)-basaltic andesite-andesite-dacite-rhyolite); 23, 24 – terrigenous sediments (molasse) (23 – coarse clastic, 24 – fine clastic); 25–30 – marine sedimentary formations (25 – terrigenous limy, 26 – limy, 27 – limy terrigenous, 28 – terrigenous limy with subordinate volcanics, 29 – terrigenous limy with basaltoids, 30 – silicic basaltoid with limestones); 31 – preorogenic basement; 32, 33 – stratigraphic boundaries (32 – concordant, 33 – discordant).

кислые вулканиты, как правило повышенной щелочности, являются членами бимодальных формаций. Наиболее масштабно кремнекислый вулканизм проявляется в среднюю стадию развития орогенных поясов. Для этого времени особенно харак-

терны извержения игнимбритов [Курчавов, 1985, 1994, 2004а; Курчавов и др., 1999].

При этом уровень щелочности кремнекислых пород в целом нарастает от ранней стадии развития орогенных поясов к поздней. Одновременно меняет-

Таблица 1. Вулканические формации разных стадий развития орогенных поясов

Table 1. Volcanic formations of different stages of orogenic belts forming

Стадии	Формации	
	Главные	Подчиненные
Поздняя	Контрастные по кремнезему повышенной щелочности (бимодальные): трахибазальт-трахириолитовая, трахибазальт-комендитовая, трахибазальт-пантеллеритовая, щелочных риолитов, ультракалийевых риолитов, щелочных базальтов	Базальт-андезитовая, трахириолитовая, трахиандезит-базальтовая
Средняя	Риолитовая, риодацитовая, риолит-трахириолитовая (туфолаво-игнимбритовая)	Андезитовая, андезит-дацитовая, щелочно-риолитовая
Ранняя	Базальт-андезитовая. Последовательно дифференцированные: базальт-андезит-риолитовая, базальт-андезит-дацит-риолитовая	Риолитовая, трахириолитовая, трахиандезитовая, щелочно-базальтовая

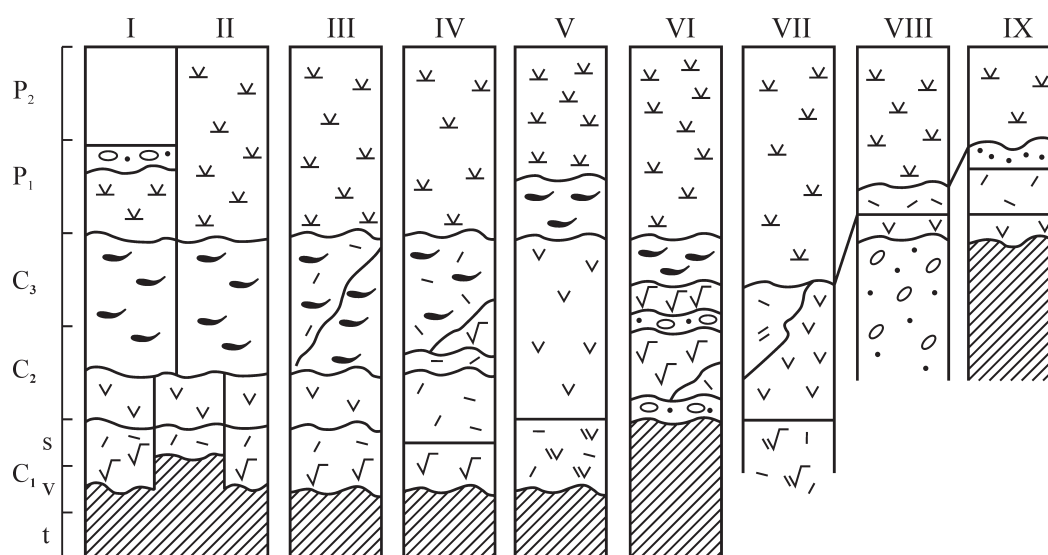


Рис. 4. Формационные ряды верхнепалеозойских орогенных вулканических поясов.

I, II – Токрауская впадина: I – северная, II – южная части; III – Северо-Восточное Прибалхашье; IV – Джунгария; V – Чаткало-Кураминский регион; VI – Чарская зона; VII–IX – Монголия: VII – Южная, VIII – Центральная, IX – Северная. Условные обозначения – см. рис. 3.

Fig. 4. Formation series of Late Paleozoic orogenic volcanic belts.

I, II – Tokrau basin: I – northern part, II – southern part; III – northeastern Balkhash region; IV – Jonggaria; V – Chatkal- Kurama region; VI – Chara zone; VII–IX – Mongolia: VII – Southern, VIII – Central, IX – Northern. For legend see Fig. 3.

ся соотношение оксидов натрия и калия в равнокислотных породах разных стадий (рис. 6). Наиболее выдержаны отношения данных оксидов, приближающиеся к единице, у пород средней стадии. В породах ранней стадии эти отношения меняются в более широком интервале. Но сильнее всего дифференцированы по данному параметру вулканы поздней стадии. Причем, чем контрастнее по кремнезему породы в формации, тем больше размах колебания оксидов натрия и калия в них с общей тенденцией усиления роли калия в породах поздней стадии.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ КРЕМНЕКИСЛОГО ВУЛКАНИЗМА ОРОГЕННЫХ ПОЯСОВ

В каждую стадию формирования орогенных вулканических поясов петрохимическая специфика-

ка пород существенно различается вкост их простираения. Соответственно, меняется и набор формаций в их пределах (табл. 2). Для окраинно-континентальных вулканических поясов характерна резко выраженная асимметричность петрохимических особенностей вулканитов [Курчавов, 1985, 1994, 2004а, б; Курчавов и др., 1999]. Фронтальной (внутренней) зоне пояса, особенно ее узкой передовой части, свойственны вулканы низкокислотной ветви известково-щелочной серии, отмечаются также породы толеитовой серии. Ярким примером служат хорошо изученные девонские вулканы Казахстана (рис. 7–9). С удалением в сторону стабилизированной области во фронтальной зоне возрастает роль изверженных кремнекислых продуктов (лав, игнимбритов) высокотемпературной ветви известково-щелочной петрохимической

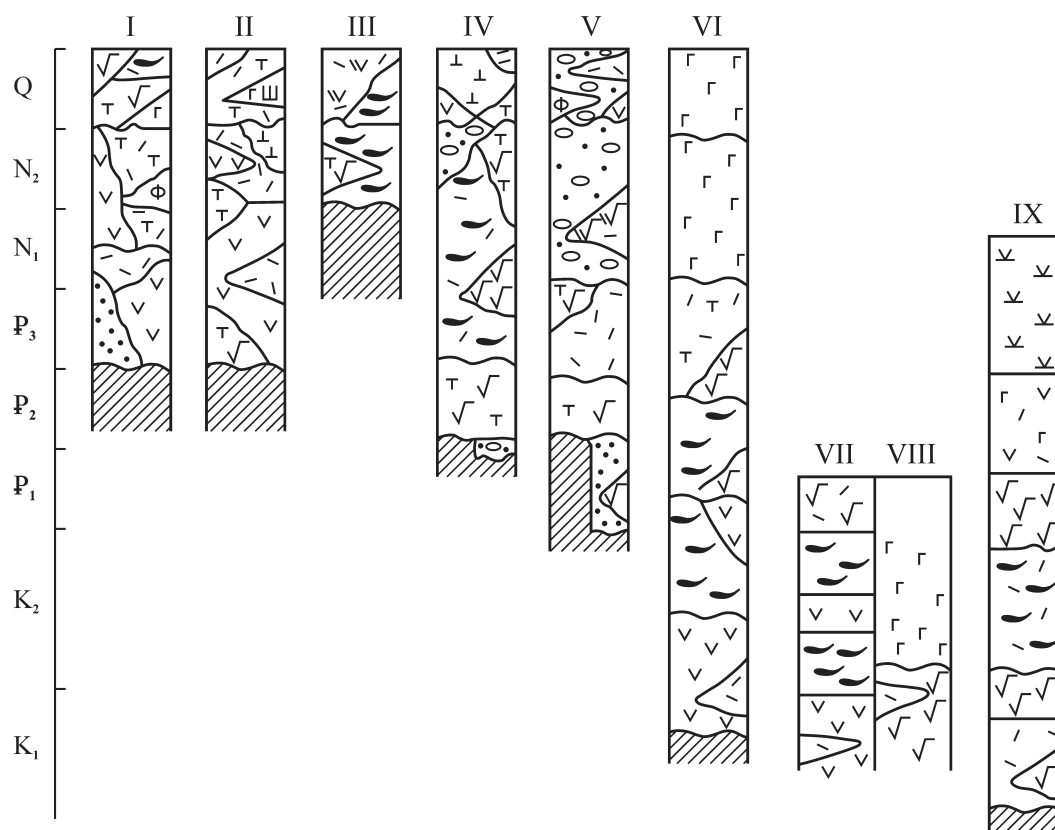


Рис. 5. Формационные ряды мезозойско-кайнозойских орогенных вулканических поясов.

I–V – Альпийский пояс: I – Турция, II – Армянское нагорье, III – Северный Кавказ, IV – Иран, V – Афганистан; VI – Восточно-Сихотэ-Алиньский пояс; VII–IX – Охотско-Чукотский пояс, Охотский сектор: VII – внешняя, VIII – внутренняя, IX – фланговая зоны пояса. Условные обозначения – см. рис. 3.

Fig. 5. Formation series of Mesozoic-Cenozoic orogenic volcanic belts.

I–V – Alpine belt: I – Turkey, II – Armenian highland, III – North Caucasus, IV – Iran, V – Afghanistan; VI – Eastern Sikhote-Alin' belt; VII–IX – Okhotsk-Chukotka belt, Okhotsk sector: VII – outer part, VIII – inner part, IX – flank part. For legend see Fig. 3.

серии. В тыловой (внешней) зоне вулканического пояса роль изверженных продуктов сокращается и возрастает значение пирокласт-осадочного и осадочного материала. Однако среди вулканитов здесь доминируют уже представители высококальциевой ветви известково-щелочной и шошонитовой (шошонит-латитовой) петрохимических серий.

В континентальных вулканических поясах коллизионного типа проявляются все отмеченные выше типы зональности вулканизма и, соответственно, петрохимических особенностей его продуктов. В целом общая щелочность и калиево-кремнекислых вулканитов здесь сравнимы с таковыми окраинно-континентальных поясов. Для энсалических островных дуг характерна симметричная зональность петрохимических параметров всех изверженных продуктов. Примером служит Чингизская девонская островодужная структура Центрального Казахстана (IV на рис. 7–9). Здесь, по границе с океаническими (на востоке) и задуговыми (на западе) бассейнами, развиваются вулка-

ниты, в том числе кремнекислые, низкокальциевой ветви известково-щелочной петрохимической серии, реже толеитовой. В осевых (внутренних) частях данной структуры преобладают уже более высокощелочные и калиевые продукты извержений. В целом, по сравнению с равнокислотными девонскими вулканитами, развитыми по краю каледонского континента Казахстана, девонские вулканиты Чингиза отличаются пониженными уровнями общей щелочности и калиево-кремнекислотности.

Одновременно во всех вулканических поясах проявлена продольная изменчивость петрохимических параметров вулканитов [Курчавов, 1994]. Так, в пределах Альпийского коллизионного пояса в позднекайнозойских континентальных вулканитах от Афганистана к Ирану и особенно в Турции заметно нарастает щелочность и калиево-кремнекислотность пород всех стадий развития [Gill, 1981; Курчавов, 1994]. Подобные региональные отличия свойственны также окраинно-континентальным поясам. Например, равнокислотные кремнекислые

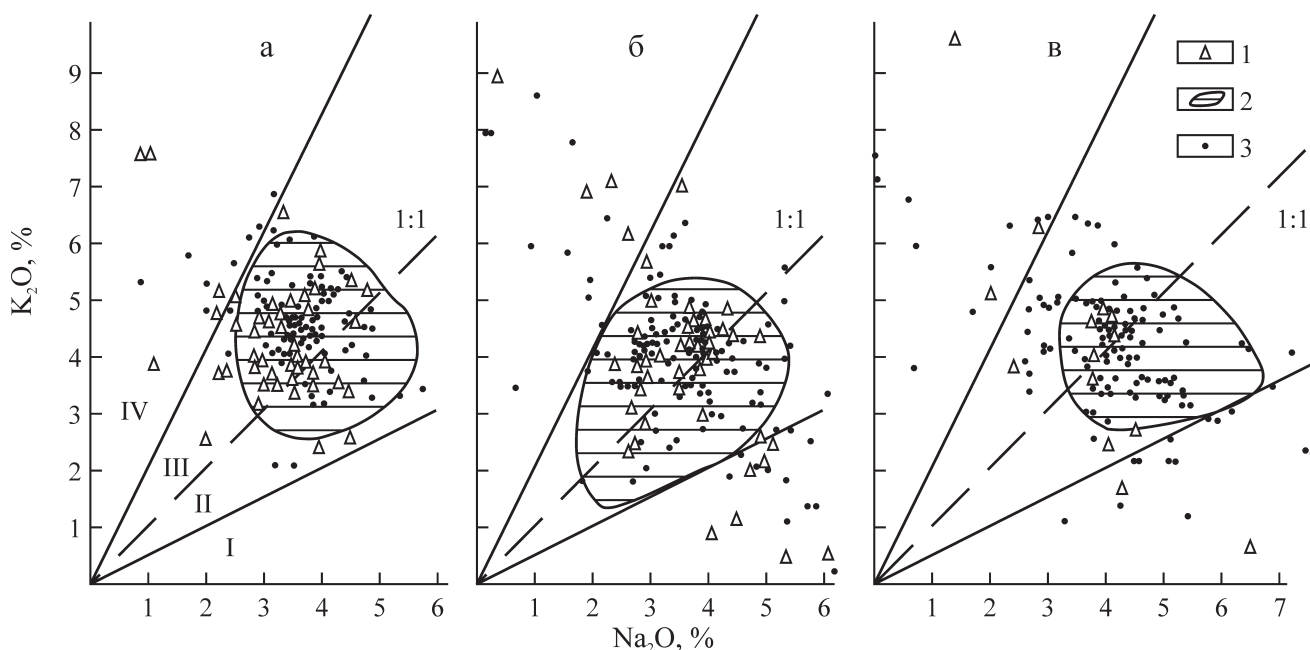


Рис. 6. Соотношение оксидов калия и натрия у верхнепалеозойских риолитов и риодацитов.

Породы орогенных стадий: 1 – ранней, 2 – средней, 3 – поздней; а – Токрауская впадина (1 – конец раннего карбона и начало башкирия, 2 – средний–поздний карбон, 3 – пермь); б – Зайлииский Алатау, Кетмень, Южная Джунгария (1 – конец раннего карбона – начало позднего карбона, 2 – поздний карбон – ранняя пермь, 3 – пермь–триас); в – Монголия (1 – карбон, 2 – пермь, 3 – бимодальные формации поздней перми). Петрохимические серии: I – толеитовая, II – низкокальцевая известково-щелочная, III – высококальцевая известково-щелочная, IV – шошонитовая (шошонит-латитовая).

Fig. 6. The ratio of the oxides of sodium and potassium in upper Paleozoic rhyolites and rhyodacites.

The rocks of orogenic stages: 1 – early, 2 – middle, 3 – late; а – Tokraus depression (1 – end of Early Carboniferous and the beginning of Bashkirian stage, 2 – Middle–Late Carboniferous, 3 – Permian); б – Zailiysky Alatau, Ketmen, Southern Jonggaria (1 – end of Early Carboniferous–beginning Late Carboniferous, 2 – Late Carboniferous–Early Permian, 3 – Permian–Trias); в – Mongolia (1 – Carboniferous, 2 – Permian, 3 – bimodal formations of the Late Permian). Petrochemical series: I – tholeiitic, II – calc-alkaline with low (II) and elevated (III) potassium contents, IV – shoshonitic.

Таблица 2. Орогенные вулканические формации разных геоструктурных позиций

Table 2. Orogenic volcanic formations of various geostructure positions

Формации	Геоструктура		
	Энсиалическая островная дуга	Вулканический пояс	
		Фронтальная зона	Тыловая зона пояса
Базальт-андезитовая	+	+	+
Андезитовая	+	+	+
Последовательно дифференцированная базальт-андезит-дацит-риолитовая	+	+	–
Последовательно-контрастная андезибазальт-риолитовая	+	+	–
Риолит-риодацитовая	+	+	+
Трахириолит-риолитовая	+	+	+
Трахириолитовая	–	+	+
Трахириолит-риолитовая со щелочными риолитами	–	–	+
Бимодальная трахибазальт-трахириолитовая	–	–	+
Трахиандезибазальтовая с трахиандезитами, андезитами и базальтами	–	–	+
Трахибазальт-базальтовая с трахитами, трахириолитами, риолитами	–	–	+

вулканыты позднепалеозойского и девонского вулканических поясов Монголии, по сравнению с та-

ковыми Казахстана, более натровые и одновременно менее глиноземистые.

Fig. 7. Modern position of volcanogenic formation of early stage of development (beginning Early Devonian) of the Kazakhstan Devonian volcanic belt by [Kurchavov et al., 2000] with additions.

Associations: 1–7 – calc-alkaline with subordinate tholeiitic varieties (1 – basalt-basaltic andesite, 2 – basalt-basaltic andesite-andesite, 3 – basaltic andesite-andesite-andesitic dacite with dacite and rhyodacite, 4 – contrast basaltic andesite-silicic, 5 – andesite-dacite-rhyolite, 6 – rhyodacite-rhyolite, 7 – terrigenous with subordinate rhydacites and rhyolites); 8–14 – mostly calc-alkaline with elevated K contents and shoshonitic (8 – trachybasalt-trachybasaltic andesite-trachyandesite-trachyte with subordinate basalts and basaltic andesites, 9 – trachybasalt-basalt, 10 – trachybasalt-trachybasaltic andesite-trachyandesite with subordinate basalts, basaltic andesites, and andesites, 11 – trachyandesite-trachydacite-trachyrhyolite, 12 – trachyandesite-trachyrhyodacite-trachyrhyolite with dacites and rhyolites, 13 – contrast trachybasaltic andesite-trachyrhyodacite, 14 – trachyrhyodacite-trachyrhyolite); 15–17 – mostly terrigenous (15 – with trachy-basalts and trachybasaltic andesites, 16 – with trachybasalts, trachybasaltic andesites, and trachyrhyodacites, 17 – with trachyrhyodacites and trachyrhyolites); 18 – terrigenous molasse, 19 – terrigenous continental and, probably, coastal-marine sediments; 20–22 – deposits: 20 – subaqueous terrigenous; 21, 22 – Devonian marine (21 – mainly terrigenous, 22 – terrigenous and volcanogenic); 23 – intrusions; 24 – exposures of the Precambrian basement in the marginal part of the Dzungaro-Balkhash zone; 25 – boundaries between different rock associations; 26, 27 – faults: 26 – regional faults (in Fig. 7 – encircled numbers: 1 – Tselinograd, 2 – Central Kazakhstan, 3 – Uspenskii, 4 – Ulutau), 27 – other faults. Letter designations in Fig. 7: ЧС – Chu-Sarysu depression, ДБ – Dzhungar-Balkhash, ИЗ – Irtysh-Zaisan mobile zones. In Figs 7–9 roman numbers denote the belt segments: I – Northeastern, II – Sarysu-Tengiz, III – Betpakdala, IV – Chingiz.

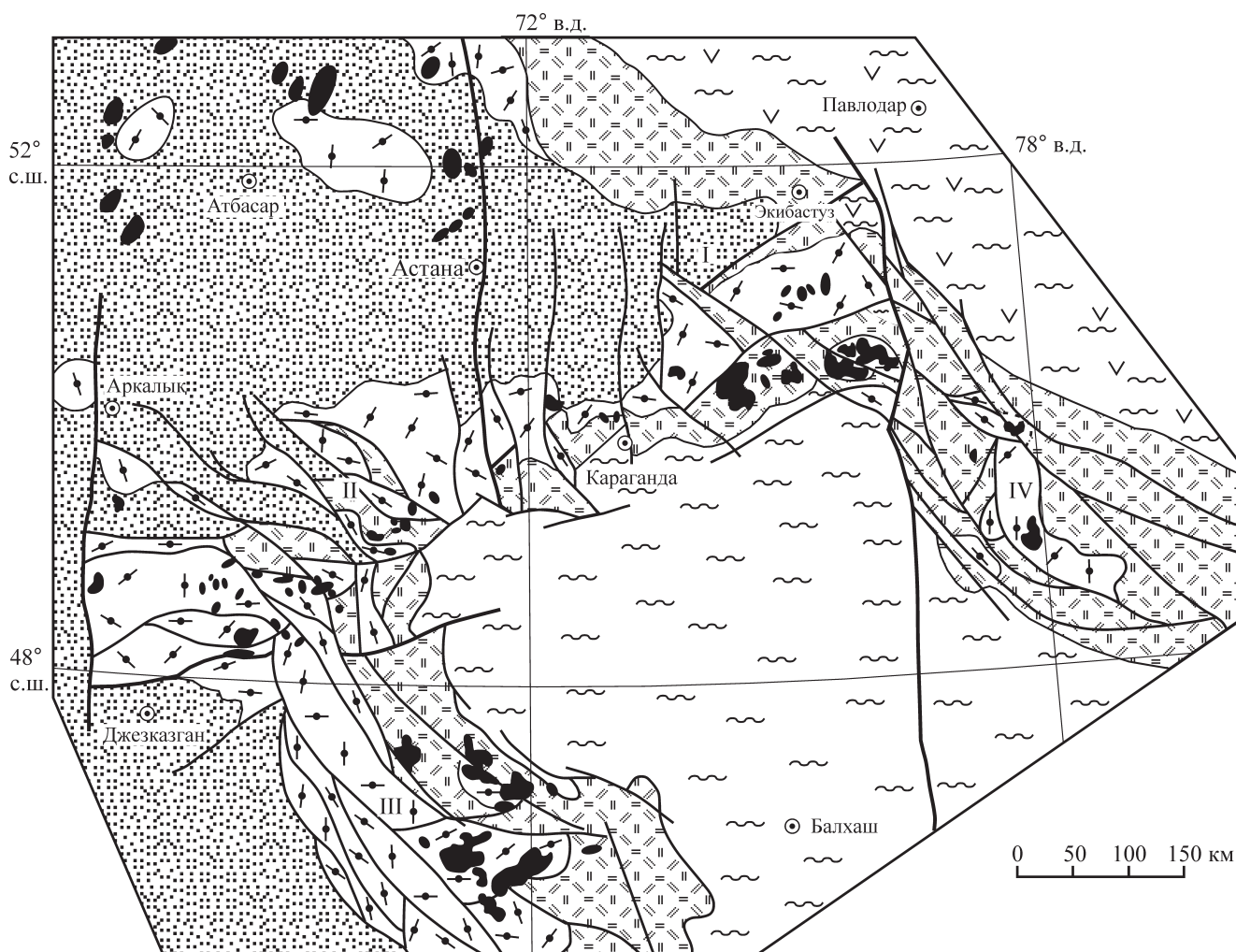


Рис. 8. Современное положение средне-орогенных ассоциаций Казахстанского девонского вулканического пояса (конец раннего девона–эйфель) по [Курчавов и др., 2000] с дополнениями.

Условные обозначения – см. рис. 7.

Fig. 8. Modern position of mid-orogenic associations (uppermost Lower Devonian–Eifelian) of the Devonian marginal volcanic belt in Central Kazakhstan by [Kurchavov et al., 2000] with additions.

For legend see Fig. 7.



Рис. 9. Современное положение вулканогенных образований поздней стадии развития Казахстанского девонского вулканического пояса (конец живетского века среднего девона – франкийский век позднего девона) по [Курчавов и др., 2000] с дополнениями.

Условные обозначения – см. рис. 7. Островодужные структуры: IIIa – Успенская, IIIб – Акжал-Аксоранская, IIIв – Тастауская, IIIг – Акбастауская, IIIд – Спасская, IIIе – Нуринский синклиорий.

Fig. 9. Modern position of volcanogenic formation of late stage of development (end of Givetian stage of Middle Devonian–Frasnian stage of Late Devonian) of the Kazakhstan Devonian volcanic belt by [Kurchavov et al., 2000] with additions.

For legend see Fig. 7. Island arc structures: IIIa – Uspenskaya, IIIб – Akzhal-Aksoran, IIIв – Tastau, IIIг – Akbastau, IIIд – Spasskaya, IIIе – Nurinskii synclorium.

Сходство в проявлении однонаправленной латеральной изменчивости ключевых вещественных параметров магматитов разных геологических ситуаций следует иметь в виду при палеорекострукции древних складчатых сооружений с их фрагментарностью выходов и нарушением первичной структуры. Установленную магматическую зональность фрагментов структур нужно интерпретировать с большой осторожностью для выделения предполагаемой фронтальной зоны вулканических поясов (и, соответственно, грани-

цы океан-континент) и подкреплять другими геологическими данными.

При этом характер и направленность магматической зональности в разные стадии формирования вулканических поясов могут существенно меняться. Односторонне направленная (или асимметричная) магматическая зональность может быть составной частью более сложной симметричной (или симметрично-зеркальной) зональности, которая в ходе развития поясов сменяет более раннюю одностороннюю зональность магматизма [Курчавов и др., 1999, 2000].

Наиболее надежные данные для определения фронтальной части вулканических поясов предоставляют раннеорогенные вулканические формации. Петрохимическую латеральную изменчивость, свойственную для данной стадии ассоциаций пород преобладающего средне-основного состава, легче связать с процессами в сейсмофокальных зонах и, соответственно, надежнее маркировать границу перехода океан-континент, особенно в древних складчатых сооружениях.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнение орогенных вулканических поясов разного возраста и разной геологической позиции показывает, что хронологическая последовательность смены состава вулканических продуктов у них имеет сходную тенденцию. Отмечается также сходная тенденция в изменении соотношений калия и натрия в вулканогенных породах разных стадий развития орогенных поясов. Кремнекислый вулканизм присутствует на всех стадиях их развития, однако расцвет его приурочен к середине орогенного этапа. При этом, чем сильнее выражена полярность вулканических пород по кремнезему (бимодальные формации), тем резче проявляется повышенная щелочность и дифференцированность кремнекислых продуктов по содержанию калия и натрия. Для среднеорогенной стадии с доминированием монопородных кремнекислых формаций характерны менее резкие вариации соотношений щелочных компонентов в породах.

В целом принципиальных различий в наборе формаций у фронтальных зон поясов и у островодужных структур не наблюдается. Однако во фронтальных зонах поясов кремнекислый вулканизм присутствует в большем объеме; при этом здесь, по сравнению с островными дугами, общая щелочность кремнекислых пород и их калиево-щелочность возрастают, усиливается также роль высококалиевой ветви известково-щелочной серии. В тыловой зоне поясов доля последних еще более возрастает, так же как и значение пород шошонитовой серии, здесь появляются собственно щелочные породы. То есть с удалением от океанического бассейна вглубь континента роль щелочных и высококалиевых пород возрастает, что по аналогии с современными активными континентальными окраинами коррелируется с ростом мощности континентальной коры и ее зрелостью.

Таким образом, сходство эволюции орогенного вулканизма поясов различных обстановок формирования свидетельствует о наличии общих кардинальных причин возникновения кремнекислых расплавов. На первый план выступают зрелость континентальной коры, ее способность давать кремнекислые расплавы и различное воздействие на коровый материал поднимающихся глу-

бинной базитовой (щелочно-базитовой) магмы и трансмагматических флюидов. Состав плавящегося субстрата оказывает существенное влияние на появление кремнекислых пород. Как показывает анализ магматизма современных островных дуг Тихого океана, возникновение кремнекислых расплавов в их пределах определяется наличием в основании данных структур блоков сиалической коры [Дмитриев, Цветков, 1983; Фролова и др., 1985; Чашин, Мартынов, 2011].

Из сказанного следует, что появление больших объемов кремнекислых вулканических извержений и их щелочность регулируются степенью сиализации земной коры и ее проницаемостью.

ПРИЧИНЫ ПОЯВЛЕНИЯ КРЕМНЕКИСЛЫХ РАСПЛАВОВ

Существующие представления о причинах появления кремнекислых магм дискуссионны. Достаточно условно эти представления можно свести к нескольким вариантам: дифференциация более основных магм, возникновение кислой магмы анатектическим путем, образование кислой магмы за счет расплавления коры под воздействием глубинных флюидов или тепла поднимающейся базальтовой магмы и др. Обоснование и критические разборы этих представлений можно найти во многих публикациях [Коржинский, 1952, 1982; Бейли Б., 1972, 1981; Бейли Д., 1972; Маракушев, Яковлева, 1975; Жариков, 1976; Добрецов, 1980; Маракушев, 1987; Эволюция..., 1983].

Гипотезы образования кислых расплавов из основных магм наталкиваются на главную трудность – громадность объема кислых орогенных вулканических пород и подчиненность им базальтоидов. К тому же кроме вулканических пород необходимо учитывать также огромные объемы гранитоидов, столь свойственные орогенным областям.

При рассмотрении возникновения кислых магм вследствие анатексиса некоторые исследователи обращают внимание на связь появления кислых магм (особенно гранитоидных) с периодами воздымания территорий и делают вывод о невозможности в таком случае попадания отложений в область высоких температур, достаточных для плавления. Признавая справедливость этих возражений, необходимо отметить, что трактовка связи внедрения кислых магм с периодами воздымания регионов требует коррективы. Причиной воздымания регионов как раз и является утолщение земной коры. Складчатые деформации наращивают вертикальную мощность коры, но еще интенсивнее, как это все больше выясняется сейчас, процесс утолщения земной коры происходит при тектоническом сжатии и скупивании [Москальский, 1979]. Как известно, мощность коры во многих регионах соизмерима с теоретически не-

обходимой для выплавления даже сухих расплавов [Попов, 1982]. В глубинные условия попадают осадки, достаточно насыщенные водой и летучими компонентами, что способствует значительному снижению температуры плавления. Из этого следует, что анатектическое плавление вещества земной коры нельзя исключать при рассмотрении проблемы возникновения кислых магм.

К решению проблемы возникновения огромных объемов кислых расплавов в полной мере приложима также разработанная Д.С. Коржинским [1952, 1982] теория сквозьмагматических растворов. Выделение в огромных объемах летучих компонентов отмечается непосредственными наблюдениями при вулканических извержениях. Об этом свидетельствует также преобладающая эксплозивная форма извержения вулканического материала. Взаимодействие флюидов с глубинными горизонтами земной коры определяется многими причинами, из которых немаловажное значение имеет характер строения коры, обусловленный тектоническими процессами. Все больше выявляется роль тектонического сжатия и скучивания масс в процессе закрытия складчатых поясов, а в строении коры, да и ниже лежащих уровней, – роль тектонических срывов, приводящих к вертикальной тектонической расслоенности литосферы.

Важнейшей отличительной чертой гранитно-метаморфического слоя континентов является региональная калиевая гранитизация [Моссаковский, 1979]. Это имеет непосредственное отношение к возникновению кислых расплавов. Как известно, Д.С. Коржинский [1952] придавал особое значение процессам метаматического замещения. Предварительная метасоматическая переработка вещества коры под воздействием флюидов нивелирует неоднородности состава коры, что приводит к выплавлению однородных щелочно-кислых продуктов. Такую возможность допускал, в частности, Д. Бейли [1972] при объяснении появления крупных объемов сиалических расплавов в рифтовых зонах. Прогрессирующим разрастанием магматических очагов путем магматического замещения вмещающих сиалических пород в связи с общей метаморфической и магматической дебазификацией земной коры А.А. Маракушев [1987] объясняет нарастание роли пород андезит-риолитового ряда в орогенических поясах.

Роль флюидов рассматривается и под другим углом зрения. Так, раскисляющим воздействием трансмагматических растворов на поднимающуюся колонну базальтового расплава трактуется образование контрастных базальт-риолитовых серий континентальных рифтовых структур [Ярмолюк, 1983].

Таким образом, в основе современных представлений о происхождении кислых расплавов орогенных поясов лежит признание ведущей роли глу-

бинных флюидов в “предварительной подготовке” вещества коры к плавлению и в эволюции расплавов. Однако очевидно, что прогрессирующее разрастание гранитно-метаморфического слоя земной коры континентов должно приводить также к высвобождению заключенных в осадках летучих компонентов, что в совокупности с подтоком флюидов из мантии должно усиливать эффект воздействия на вышележащие уровни. Другими словами, нельзя исключить значительную роль в магмогенезе летучих компонентов “корового” происхождения. Возможность такого процесса была показана И.Д. Рябчиковым [1979, 1985].

В этом отношении симптоматично изменение содержания калия в вулканитах вкрест простирающихся поясов – возрастание роли калия в равнокислотных породах от фронтальной зоны поясов к их внутренней зоне. Повышенную калиевость вулканитов обычно связывают с большой глубиной зарождения породивших их расплавов. Но, возможно, здесь проявляется суммирующее воздействие разных факторов. Отчетлива связь высококалиевых пород с глубинными разломами, приуроченными нередко к границам блоков ранней стабилизации. Относительная узость таких разломных зон при большой глубине заложения способствует обогащению расплавов щелочными элементами за счет разных источников, на что уже обращалось внимание [Watson, 1982].

ВЫВОДЫ

Интенсивность проявления кремнекислого вулканизма коррелируется с геотектонической обстановкой и напрямую зависит от подготовленности коры к возможному выплавлению больших объемов кремнекислых расплавов. С этим же связаны уровни щелочности и вариации отношений натрия и калия в породах. Кремнекислый вулканизм возникает на разных этапах формирования орогенных вулканических поясов, но максимум его приходится на средне-орогенную стадию. На ранней стадии развития орогенных поясов кремнекислые вулканиды входят в состав последовательно дифференцированных формаций, на поздней стадии – в состав контрастных по кремнезему (бимодальных) формаций. В средне-орогенную стадию формируются преимущественно монопородные формации кремнекислых вулканидов (игнимбритовые или туфолово-игнимбритовые), более выдержанные по содержанию натрия и калия, чем кремнекислые породы ранней и поздней стадий.

В целом кремнекислые вулканиды окраинно-континентальных и коллизионных поясов более насыщены щелочными элементами, чем сходные с ними по количеству кремнезема вулканиды энсиалических островных дуг.

Вкрест простирающихся поясов кремнекислые вулканиды существенно меняют свои петрохимиче-

ские характеристики. Во фронтальных зонах поясов преобладают породы низкокалиевой ветви известково-щелочной петрохимической серии, в тыловых зонах поясов более распространены представители уже высококалиевой ветви этой серии и шошонит-латитовой группы.

Таким образом, выявленные пространственно-хронологические закономерности эволюции орогенного вулканизма позволяет сделать вывод о решающем значении гранитно-метаморфического слоя для возникновения в значительных объемах кремнекислых расплавов при суммарном воздействии тепла более глубокой базальтоидной магмы, трансмагматических флюидов и реомобилизованных "корových" летучих компонентов.

Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ (проекты 08-05-00423 и 14-05-00728), программ фундаментальных исследований Президиума РАН (программы № 4-2010-2014 гг., программ № 18-2015 и № 15-2016 г.) и базовой тематики ИГЕМ РАН (1.15 П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бейли Б. (1972) Введение в петрологию. М.: Мир, 280 с.
- Бейли Б. (1981) Континентальный рифтогенез и дегазация мантии. *Континентальные рифты*. М.: Мир, 20-30.
- Бейли Д. (1972) Поток летучих, концентрация тепла и генерация магмы. *Механизм интрузии магмы*. Т. 48. М.: Мир, 152-160.
- Дмитриев Ю.И., Цветков А.А. (1983) Магматизм активных окраин океана. *Изв. АН СССР. Сер. геол.*, (3), 3-18.
- Добрецов Н.Л. (1980) Введение в глобальную петрологию. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 200 с.
- Жариков В.А. (1976) Основы физико-химической петрологии. М.: Изд-во МГУ, 420 с.
- Коржинский Д.С. (1952) Гранитизация как магматическое замещение. *Изв. АН СССР. Сер. геол.*, (2), 56-69.
- Коржинский Д.С. (1982) Теория метасоматической зональности. М.: Наука, 104 с.
- Курчавов А.М. (1985) Зональность девонского орогенного вулканизма Казахстана и Средней Азии. *Геотектоника*, (6), 62-73.
- Курчавов А.М. (1994) Латеральная изменчивость и эволюция орогенного вулканизма складчатых поясов. *Геотектоника*, (2), 3-18.
- Курчавов А.М. (2004а) Зональность орогенного вулканизма и проблемы ее геодинамической интерпретации. *Литосфера*, (3), 71-83.
- Курчавов А.М. (2004б) Формационные ряды орогенных вулканических поясов и их значение для палеореконструкций. *Геология и геофизика*, 45(12), 1418-1426.
- Курчавов А.М., Баскина В.А., Бахтеев М.К., Моссаковский А.А. (1999) Проблемы геодинамической и палеотектонической интерпретации петрохимической зональности вулканических поясов. *Геотектоника*, (1), 64-80.
- Курчавов А.М., Гранкин М.С., Мальченко Е.Г., Жуковский В.И., Хамзин Б.С., Мазуров А.К., Хамза С.Х. (2000) Зональность, сегментированность и палеогеодинамика девонского вулканического пояса Центрального Казахстана. *Геотектоника*, (4), 32-43.
- Маракушев А.А. (1987) Вулканические серии горных пород и проблемы их генезиса. *Изв. вузов. Геология и разведка*, (11), 44-56.
- Маракушев А.А., Яковлева Е.Б. (1975) Генезис кислых лав. *Вест. МГУ. Сер. 4. Геология*, (1), 3-24.
- Моссаковский А.А. (1979) Структурные и вещественные аспекты проблемы становления континентальной коры. *Тектоническое развитие земной коры и разломы*. М.: Наука, 159-170.
- Попов В.С. (1982) Петролого-геохимическая модель формирования орогенных известково-щелочных серий. *Геохимия магматизма*. М.: Наука, 93-124.
- Рябчиков И.Д. (1979) Поведение калия и сопутствующих элементов в процессах глубинного анатексиса. *Проблемы физико-химической петрологии*. Т. 1. М.: Наука, 262-270.
- Рябчиков И.Д. (1985) Водные растворы в верхней мантии и проблемы дегазации Земли. *Подземные воды и эволюция литосферы*. Т. 1. М.: Наука, 176-206.
- Тектоника Северной Евразии (объяснительная записка к Тектонической карте Северной Евразии масштаба 1:5 000 000). (1980) М.: Наука, 224 с.
- Фролова Т.И., Бурикова И.А., Гуцин А.В. Фролов В.Т., Сывороткин В.Л. (1985) Происхождение вулканических серий островных дуг. М.: Недра, 275 с.
- Херасков Н.П. (1967) Тектоника и формации. Избр. тр. М.: Наука, 404 с.
- Чашин А.А., Мартынов Ю.А. (2011) Петрология пород вулканов Горелый и Мутновский (Южная Камчатка). Владивосток: Дальнаука, 270 с.
- Эволюция изверженных пород. (1983) М.: Мир, 527 с.
- Ярмолюк В.В. (1983) Позднепалеозойский вулканизм континентальных рифтогенных структур Центральной Азии. М.: Наука, 197 с.
- Gill J.B. (1981) Orogenic andesites and plate tectonics. B., N. Y.: Springer, 356 p.
- Watson E.B. (1982) Melt infiltration and magma evolution. *Geology*, 10(5), 236-240.

REFERENCES

- Beily B. (1972) *Vvedenie v petrologiyu* [Introduction to petrology]. Moscow, Mir Publ., 280 p. (In Russian)
- Beily B. (1981) Continental rifting and mantle degassing. *Kontinentalnye rifty* [Continental rifts]. Moscow, Mir Publ., 20-30. (In Russian)
- Beily D. (1972) The flux of volatiles, the concentration of heat and the generation of magma. *Mekhanizm intruzii magmy*. T. 48 [Mechanism of magma intrusion. V. 48]. Moscow, Mir. Publ., 152-160. (In Russian)
- Chashchin A.A., Martynov Yu.A. (2011) *Petrologiya porod vulkanov Gorelyi i Mutnovskii (Yuzhnaya Kamchatka)* [Petrology of the rocks of Gorelyi and Mutnovskii volcanoes (Southern Kamchatka)]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 270 p. (In Russian)
- Dmitriev Yu.I., Tsvetkov A.A. (1983) Magmatism of the active margins of the ocean. *Izv. Akad. Nauk USSR. Ser. Geol.*, (3), 3-18. (In Russian)
- Dobretsov N.L. (1980) *Vvedenie v globalnuyu petrologiyu* [Introduction to global petrology]. Novosibirsk, Nauka Publ., 200 p. (In Russian)

- Evolutsiya izverzhennykh porod* (1983) [The evolution of igneous rocks]. Moscow, Mir Publ., 527 p. (In Russian)
- Frolova T.I., Burikova I.A., Gushchin A.V., Frolov V.T., Syvorotkin V.L. (1985) *Proiskhozhdenie vulkanicheskikh serii ostrovnykh dug* [The origin of island arcs volcanic series]. Moscow, Nedra Publ., 275 p. (In Russian)
- Gill J.B. (1981) *Orogenic andesites and plate tectonics*. Berlin, New York, Springer, 356 p.
- Kheraskov N.P. (1967) *Tektonika i formatsii*. Izbr. trudy. [Tectonics and formations. Fav. Worcs]. Moscow, Nauka Publ., 404 p.
- Korzhinskii D.S. (1952) Granitization as magmatic substitution. *Izv. Akad. Nauk SSSR. Ser. Geol.*, (2), 56-69. (In Russian)
- Korzhinskii D.S. (1982) *Teoriya metasomaticheskoi zonalnosti* [The theory of metasomatic zoning]. Moscow, Nauka Publ., 104 p. (In Russian)
- Kurchavov A.M. (1985) Zonation of Devonian orogenic volcanism in Kazakhstan and Central Asia. *Geotektonika*, (6), 62-73. (In Russian)
- Kurchavov A.M. (1994) Lateral variations and evolution of orogenic volcanism in fold belts. *Geotectonics*, **28**(2), 92-106.
- Kurchavov A.M. (2004) Zoning of orogenic volcanism and problems of its geodynamic interpretation. *Litosfera*, (3), 71-83. (In Russian)
- Kurchavov A.M. (2004) Formation series in orogenic volcanic belts: implications for paleoenvironments. *Geol. Geofiz.*, **45**(12), 1418-1426. (In Russian)
- Kurchavov A.M., Baskina V.A., Bakhteev M.K., Mossakovskii A.A. (1999) Geochemical zoning of volcanic belts: problems of geodynamic and paleotectonic interpretation. *Geotektonika*, (1), 64-80. (In Russian)
- Kurchavov A.M., Grankin M.S., Mal'chenko E.G., Zhukovskii V.I., Khamzin B.S., Mazurov A.K., Khamza S.Kh. (2000) Zoning, segmentation, and paleogeodynamics of the devonian volcanic belt in Central Kazakhstan. *Geotektonika*, (4), 32-43. (In Russian)
- Marakushev A.A. (1987) Volcanic series of rocks and the problems of their genesis. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Geologiya i razvedka*, (11), 44-56. (In Russian)
- Marakushev A.A., Yakovleva E.B. (1975) The genesis of acid lavas. *Vestn. Mosk. Univ. Ser. 4. Geol.*, (1), 3-24. (In Russian)
- Mossakovskii A.A. (1979) Structural and material aspects of the problem of the formation of the continental crust. *Tektonicheskoe razvitie zemnoi kory i razlomy*. [Tectonic development of Earth's Crust and faults] Moscow, Nauka Publ., 159-170. (In Russian)
- Popov V.V. (1982) Petrologo-geochemical model of formation of orogenic lime-alkaline series. *Geokhimiya magmatizma* [Geochemistry of magmatism] Moscow, Nauka Publ., 93-124. (In Russian)
- Ryabchikov I.D. (1979) Behavior of potassium and accompanying elements in the processes of deep anataxis. *Problemy fiziko-khimicheskoi petrologii. T.1.* [Problems of physical-chemical Petrology V.1]. Moscow, Nauka Publ., 262-270. (In Russian)
- Ryabchikov I.D. (1985) Water solutions in the upper mantle and the problems of degassing of the Earth. *Podzemnye vody i evolyutsiya litosfery. T. 1.* [Underground waters and evolution of lithosphere. V. 1.] Moscow, Nauka Publ., 176-206. (In Russian)
- Tektonika Severnoi Evrazii (ob"asnitelnaya zapiska k Tektonicheskoi karte Severnoi Evrazii masshtaba 1:5 000 000)* (1980) [Tectonics of Northern Eurasia (explanatory note to the Tectonic map of Northern Eurasia, scale 1 : 5,000,000)]. Moscow, Nauka Publ., 224 p. (In Russian)
- Watson E.B. (1982) Melt infiltration and magma evolution. *Geology*, **10**(5), 236-240.
- Yarmolyuk V.V. (1983) *Pozdnepaleozoyskii vulkanizm kontinentalnykh riftogennykh struktur Tsentralnoi Azii* [Late Paleozoic Volcanism of continental rifting structures of Central Asia] Moscow, Nauka Publ., 197 p. (In Russian)
- Zharikov V.A. (1976) *Osnovy fiziko-khimicheskoi petrologii* [Foundations of physical-chemical petrology]. Moscow, MGU Publ., 420 p. (In Russian)