

Вулканизм, новейшая геодинамика

УДК 551.21+550.42(51)

<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.98>

Геологические, минералогические и геохимические признаки смешения расплавов контрастного состава и контаминации расплавов перидотитовым материалом под Восточной группой вулканов Удаляньчи, СВ Китай

И.С. Чувашова^{1,2}, И-мин Сунь³, С.В. Рассказов^{1,2}, Т.А. Ясныгина¹, Е.В. Саранина^{1,4}

¹Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

³Институт природных ресурсов и экологии Хэйлунцзянской академии наук, Харбин, Китай

⁴Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия

Аннотация. При детальном опробовании получены данные, свидетельствующие об одновременном извержении и смешении расплавов контрастного состава из разных источников под вулканом Дзяодебушан и более поздней контаминации расплавов перидотитовым материалом под вулканом Сяогушан.

Ключевые слова: Калиевые породы, микроэлементы, изотопы Pb, оливин, транстенсия, Удаляньчи, Северо-Восточный Китай.

Geological, Mineralogical, and Geochemical Evidence on Mixing of Contrast Melts and Contamination of Melts by Peridotite Material beneath the Eastern Group of Volcanoes in Wudalianchi, NE China

I.S. Chuvashova^{1,2}, Yi-min Sun³, S.V. Rasskazov^{1,2}, T.A. Yasnygina¹, E.V. Saranina^{1,4}

¹Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

³Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin, China

⁴Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. Due detail sampling, we get data indicating simultaneous eruption and mixing of melts of contrasting compositions from different sources under the Jiaodebushan volcano and the later contamination of melts with crystalline peridotite material under the Xiaogushan volcano.

Keywords: Potassic rocks, trace elements, Pb isotopes, olivine, transtension, Wudalianchi, North-east China.

Постановка вопроса

Бинарное смешение магматических расплавов – распространенная интерпретация описания взаимосвязи между концентрациями несовместимых элементов и изотопными отношениями Sr–Nd–Pb в океанических и континентальных базальтах. Процесс бинарного смешения часто воспринимается как

аксиома, не требующая доказательств, в разных наборах данных на локальном, региональном и глобальном уровнях. Между тем, создающая петрологическая роль процесса смешения нуждается в аргументации. Продукты вулканических извержений могут представлять собой непосредственный результат плавления материала источника, могут контаминироваться материалом кристал-

лических пород и вовлекаться в кристаллизационную дифференциацию.

При соприкосновении базальтовых и риолитовых расплавов гомогенизация обычно предотвращается быстро формирующейся коркой стекловатого базальта, охлажденного на контакте с кислой магмой. Из экспериментов следует, что между водонасыщенными риолитовым и базальтовым расплавами в течение некоторого времени сохраняется поверхность раздела и может осуществляться перераспределение компонентов (Yoder, 1973). Полная гомогенизация с образованием промежуточных составов происходит в результате перемешивания расплавов до состояния эмульсии (Blake et al., 1965).

В гранитных телах иногда находят овоиды базальтового состава с каемками закалки, свидетельствующие о внедрении и дезинтеграции базальтовых расплавов в гранитном расплавленном теле-хозяине. Такие находки неполного смешения базальтовых и гранитных расплавов характеризуются как явление минглинга (mingling). Продукты минглинга отличаются от смешения базальтовых расплавов основного и среднего состава (или основного состава) по конечным продуктам, запечатленным в породах. В случае минглинга матрица остается гранитной с сохранением контраста с базальтовыми овоидами. В случае одновременного извержения расплавов основного и среднего состава (или основного состава), наряду с контрастными вулканическими породами, могут встречаться однородные серии промежуточного состава, которые воспринимаются как гомогенизированная смесь.

На континентах имеются многочисленные геологические примеры фактов, свидетельствующих о механическом смешении контрастных расплавов основного и среднего состава. При одновременном внедрении базальтовых и трахитовых расплавов в верхнюю часть коры наблюдаются признаки ме-

ханического и химического взаимодействия между ними, выходящие за рамки простых смесей (Sethna, Battiwala, 1976; Рассказов, 1985). В качестве показателя смешения фонолитовой и базанитовой магм рассматривалась обратная зональность оливиновых зерен (Sundermeyer et al., 2020).

Цель настоящей работы – представить геологические, минералогические и геохимические доказательства смешения расплавов контрастного состава на вулкане Восточный Дзяодебушан Восточной группы вулканов Удаляньчи и контаминации расплавов перидотитовым материалом на вулкане Сяогушан в этой же группе.

Общая характеристика поля Удаляньчи и опробование вулканических пород построек Восточный Дзяодебушан и Сяогушан

Последовательность извержений вулканов Удаляньчи реконструируется по данным K–Ar датирования (Zhang et al., 1995; Wang et al., 1996; Liu et al., 2001; Liu, Taniguchi, 2001; Wang, Chen, 2005; Guide book..., 2010; Zhao et al., 2014). Различается Центральная, Западная и Восточная группы вулканов. В первой из них извержения последовательно мигрируют в течение 2.5 млн лет с юго-запада на северо-восток, от лавового потока Лаошантоу до вулканов Лаохейшан и Хуошаошан, в двух других в общем составляют фон хаотичных извержений (Rasskazov et al., 2016). Вулканы Восточный Дзяодебушан и Сяогушан принадлежат Восточной группе вулканов Удаляньчи. Первый извергался в интервале 0.87–0.43 млн лет назад, второй – 0.38–0.24 млн лет назад (Liu et al., 2001; Wang, Chen, 2005) (рис. 1).

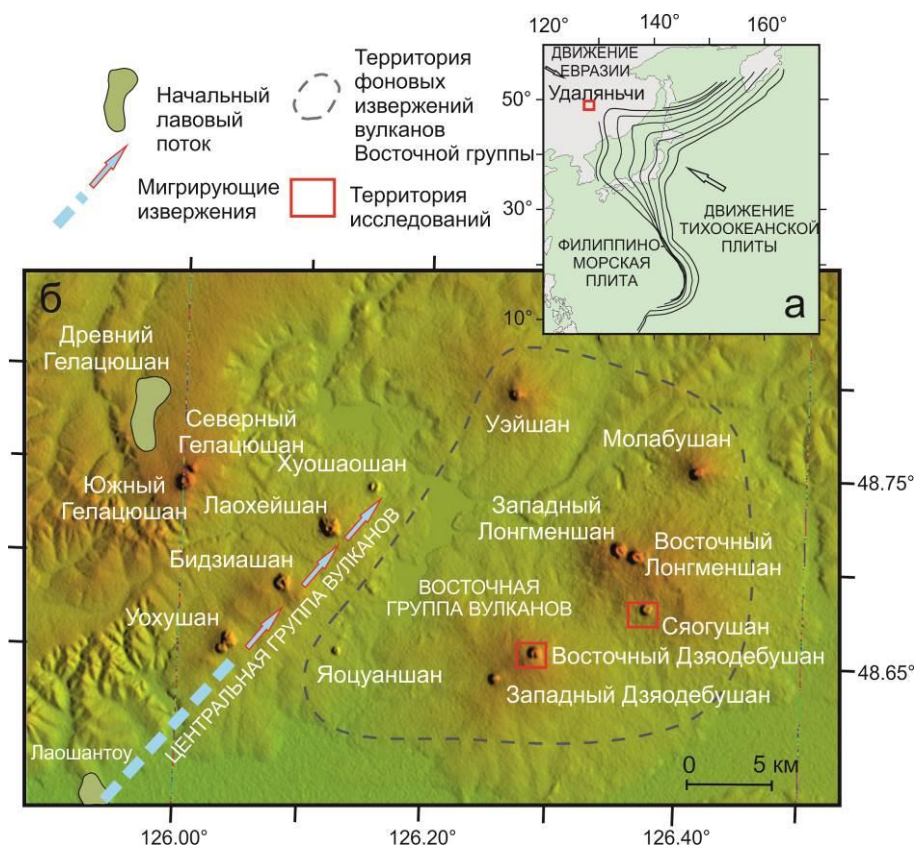


Рис. 1. Пространственное положение вулканов Восточный Дзяодебушан и Сяогушан Восточной группы относительно Центральной группы вулканов на поле Удаляньчи (Rasskazov et al., 2016 и ссылки в этой работе).

Fig. 1. Spatial position of the East Jiaodebushan and Xiaogushan volcanoes of the Eastern group relative to the Central one in the Wudalianchi field (Rasskazov et al., 2016 and references therein).

На вулкане Восточный Дзяодебушан опробованы лавовые потоки пьедестала конуса (обр. СН-15-37) и внутренней части его кратера (обр. СН-15-24–25). Образцы шлаков и фрагментов массивных пород конуса отобраны на юго-восточном склоне его кратера (обр. СН-15-26–27), вдоль круговой верхней кромки кратерного вала (обр. СН-15-28–34) и на юго-западном склоне кратера (обр. СН-15-35–36) (рис. 2а).

На вулкане Сяогушан опробован южный край конуса, вскрытый карьером (рис. 2б). В пирокластическом материале вулканическо-

го конуса преобладает сыпучий мелкообломочный шлаковый материал без порфировых вкрапленников. На его фоне выделяются крупные (до 1.5 м) бомбы с плотной сердцевинной, сложенной черными породами с крупными (до 0.5 см) порфировыми выделениями оливина (рис. 3). Гипсометрически ниже шлакового конуса находится лавовый поток с видимыми зернами оливина, составляющими основную массу породы (обр. СН-16-280). Этот поток относится к пьедесталу постройки вулкана Саогушан.

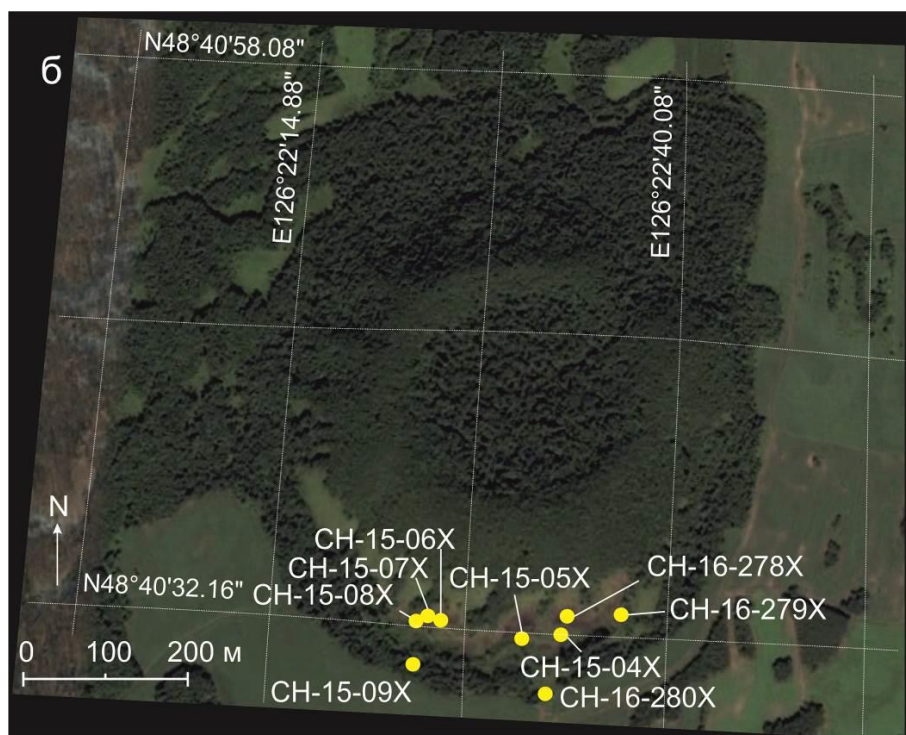
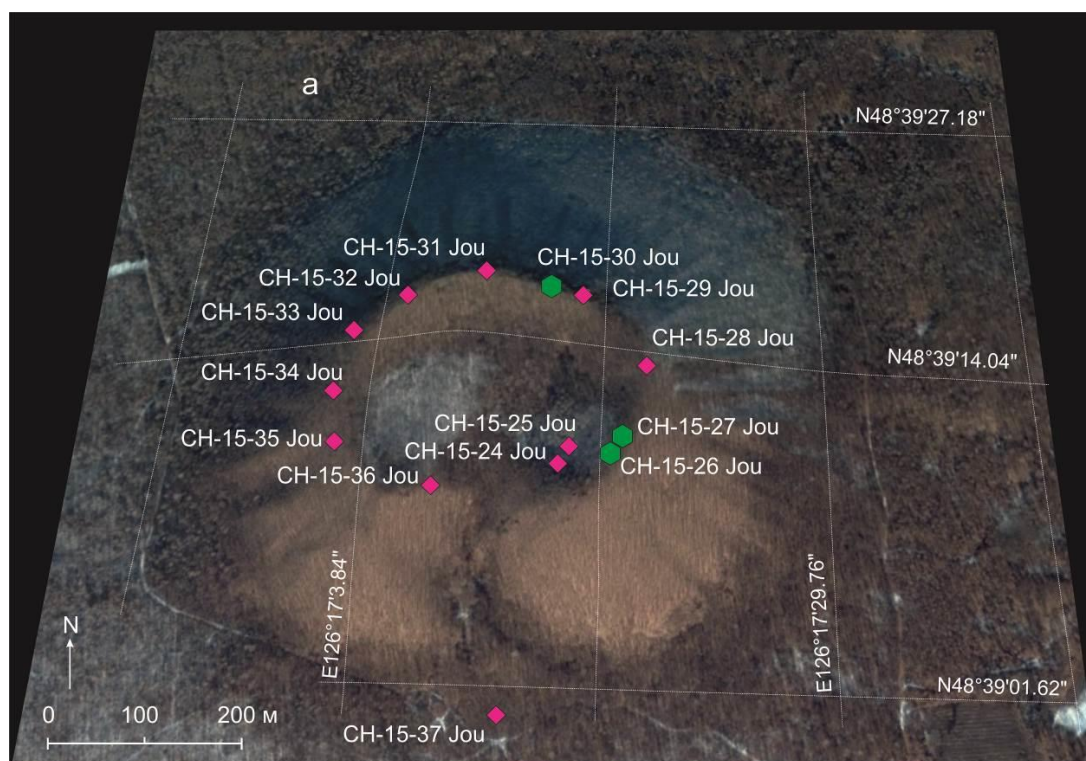


Рис. 2. Точки опробования вулканов Восточный Дзяодебушан (*a*) и Сяогушан (*б*). На панели *a* зелеными шестиугольниками обозначено местоположение образцов умеренно-Mg состава, малиновыми ромбами – местоположение образцов низко-Mg состава.

Fig. 2. Sampling sites of the East Jiaodebushan (*a*) and Xiaogushan (*b*) volcanoes. In panel *a*, green hexagons indicate the location of samples of moderate-Mg composition, and crimson diamonds indicate the location of samples of low-Mg one.



Рис. 3. Сыпучий мелкообломочный шлаковый материал, включающий вулканические бомбы массивных пород с крупными ксенокристаллами оливина (карьер в южной части вулканического конуса Сяогушан).

Fig. 3. Loose fine-clastic slag material including volcanic bombs of massive rocks with large olivine xenocrysts (quarry in the southern part of the Xiaogushan volcanic cone).

Методика исследований

Аналитические исследования микроэлементного состава вулканических пород выполнены методом ICP-MS на масс-спектрометре Agilent 7500ce. Характеристика использованных методик приведена в работе (Ясныгина и др., 2015). Петрогенные оксиды определены классическими методами химического анализа (Сизых, 1985). Изотопный анализ свинца проводился на приборе MC-ICP-MS Neptune Plus по методике, приведенной в статье (Rasskazov et al., 2020). Состав оливина изучался с помощью сканирующего электронного микроскопа с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром (ESM-EDXRF) Quanta 200, FEI Company (аналитик К.Ю. Арсентьев).

Особенности состава оливина в породах вулкана Сяогушан

В лавовом потоке массивных оливин-порфировых пород из пьедестала постройки (обр. СН-16-280) с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) определялся состав фенокристаллов оливина размером 600–700 μm (рис. 4), равномерно расцентрованных в основной массе. В центре зерна определено 86 % форстерита, на краю зерна – 96 % форстерита. Возрастание магнетиальности оливина от центра к краю зерна подобно случаю, охарактеризованному при извержении с образованием кратера Лаахе Си (Эйфель) (Sundermeyer et al., 2020). Зерна оливина кристаллизовались из расплава при относительно низкой ликвидусной температуре и дорастали в условиях воздействия повышенной температуры вмещающего расплава.

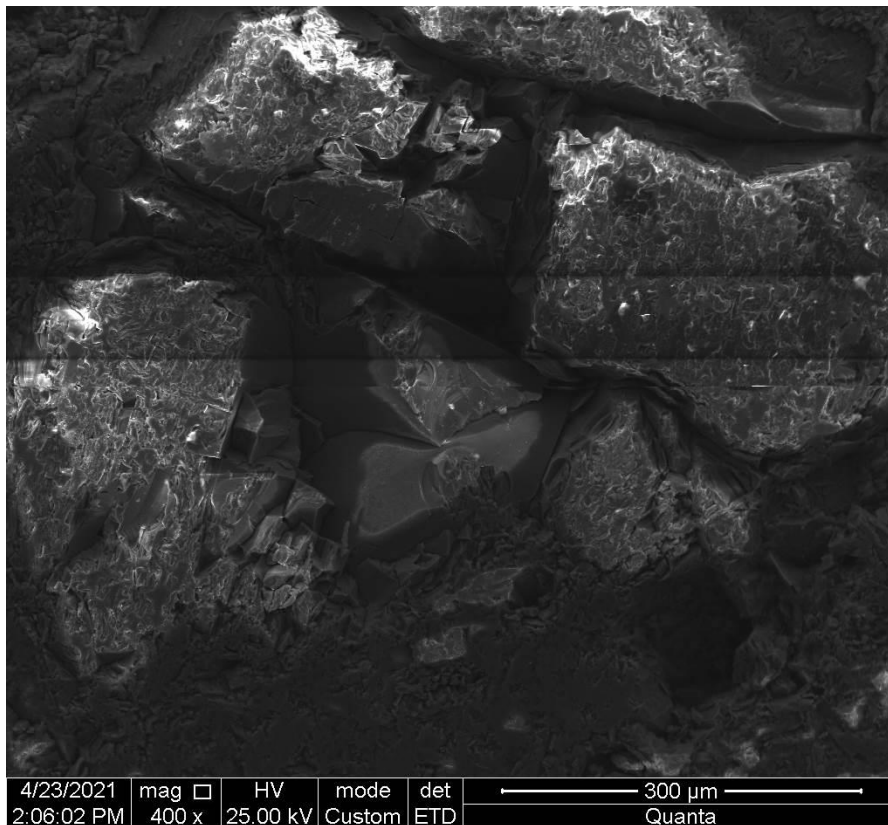


Рис. 4. Фотография СЭМ пришлифовки зерна оливина основной массы породы из лавового потока в основании вулкана Сяогушан (обр. CH-16-280).

Fig. 4. SEM photograph of grinding olivine grains of the ground mass of rock from a lava flow at the base of the Xiaogushan volcano (sample CH-16-280).

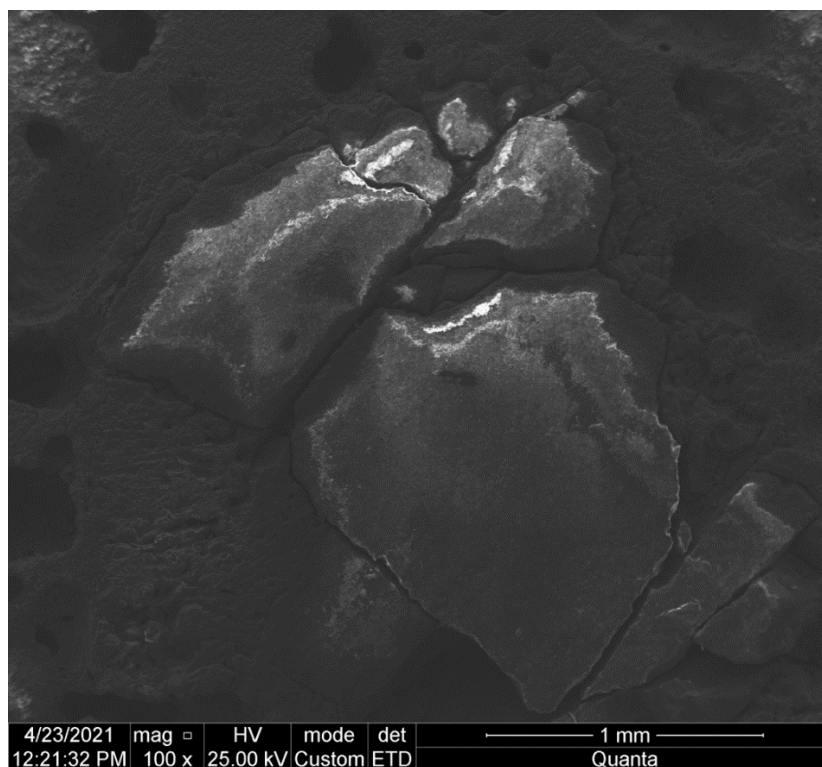


Рис. 5. Фотография СЭМ пришлифовки зерна ксенокристалла оливина в пористой части периферии вулканической бомбы из пирокластического материала вулканического конуса Сяогушан.

Fig. 5. SEM photograph of grinding olivine xenocrystic grain in the porous part of the periphery of a volcanic bomb from pyroclastic material in the Xiaogushan volcanic cone.

В бомбах из пирокластического материала этого вулкана рассеяны одиночные ксенокристаллы оливина. Они встречаются главным образом во внутренней массивной части вулканических бомб и лишь частично попадают в их пористую периферию. Преобладают зерна размером 1–2 мм (рис. 5). Наиболее крупные индивиды достигают 0.5 см.

На профиле через зерно оливина (рис. 6) определяется высокое магнезиально-железистое отношение ($Mg\#$) при снижении концентрации Fe от края к ядру до ничтожно малого значения. Обозначаются следы Na и Al. Содержание Ca меняется от 1.5 до 3.5 %. В точке с минимальной концентрацией Ca определяется значимое содержание Al (до 1

%). Содержание Si варьируется от 16 до 20 %. В отраженных электронах видно, что зерно состоит в основном из компонентов оливина (Mg и Si), но определяются и другие элементы, обычно не входящие в таких количествах в стехиометрию оливина. Особенно обращает на себя внимание высокая концентрация Ca (рис. 7). Этот элемент входит в виде примеси в кристаллическую структуру оливина в условиях низкого давления. В данном случае существенная примесь кальция (от 1 до 3.5 %) в оливиновом ксенокристалле связана с воздействием на него вмещающего расплава. В оливине, кристаллизующемся в основной массе, содержание Ca составляет 0.2–0.3 %.

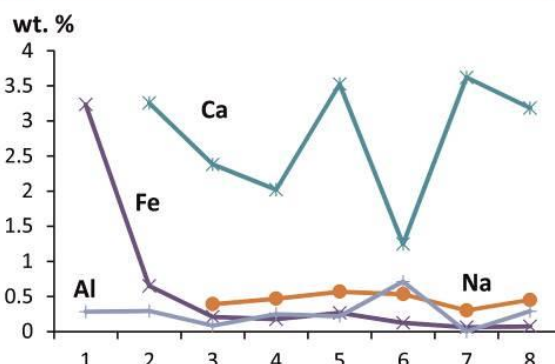
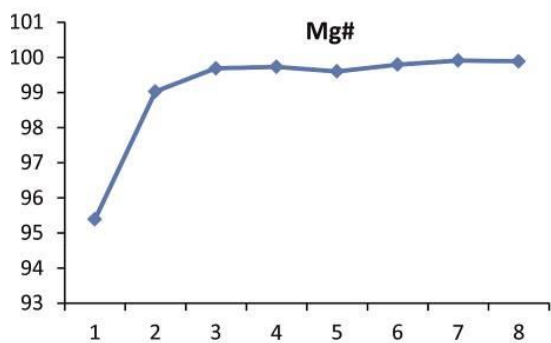


Рис. 6. СЭМ-изображение и распределение элементов, показывающее зональность крупного кристалла оливина из вулканической бомбы в шлаке вулкана Сяогушан (обр. СН-16-279).

Fig. 6. SEM image and element distribution showing zonation of large olivine crystal from a volcanic bomb within slag of the Xiaogushan volcano (обр. CH-16-279).

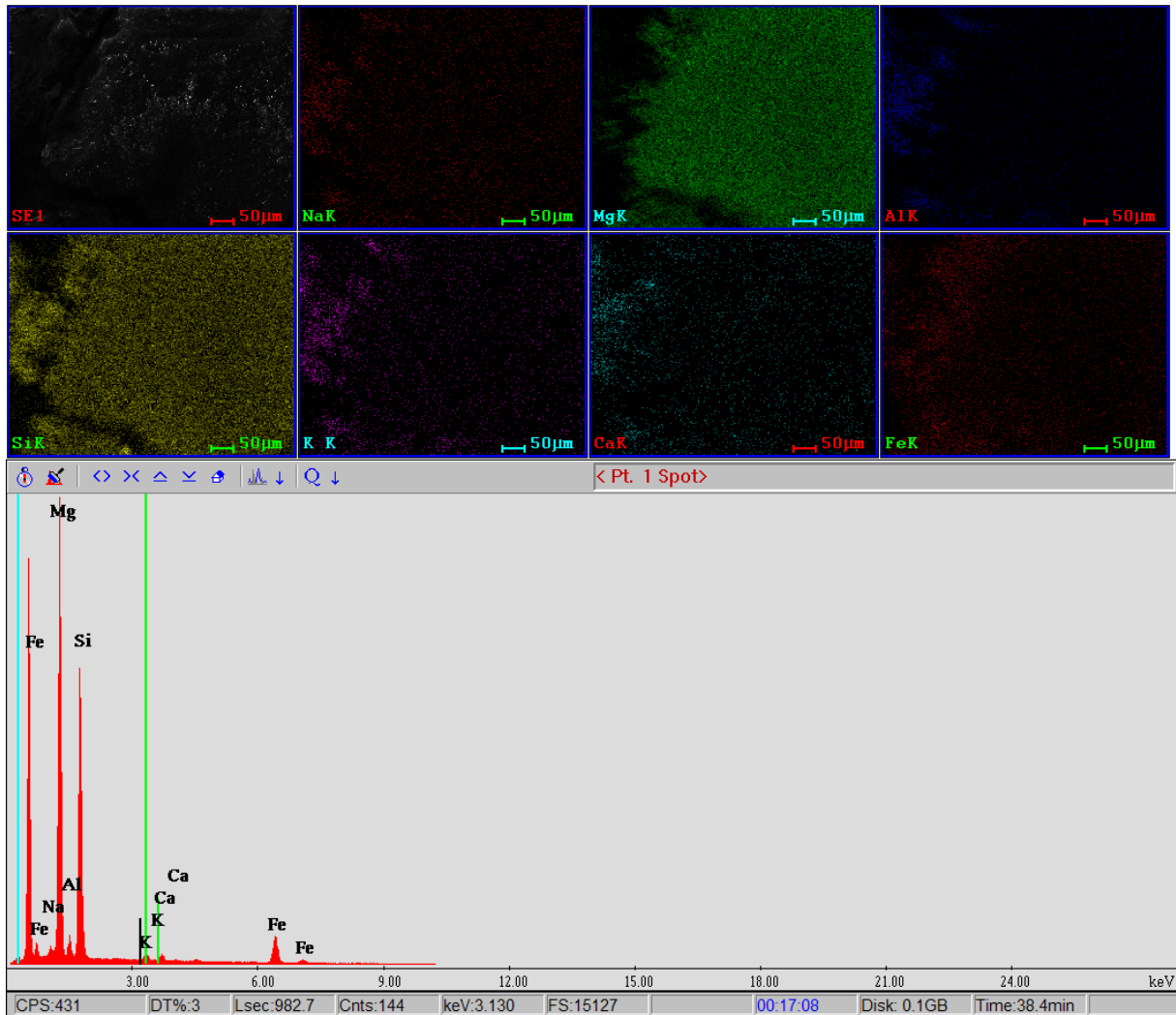


Рис. 7. Фрагмент зерна оливинового ксенокристалла из обр. СН-16-279 в отраженных электронах (верхняя панель) и пики концентраций по данным СЭМ (нижняя панель).

Fig. 7. Fragment of an olivine xenocryst from sample СН-16-279 in reflected electrons (top panel) and concentration peaks from SEM data (bottom panel).

Петрогенные оксиды

Вулканические породы поля Удаляньчи образуют серию от умеренно-Mg до низко-Mg составов (Rasskazov et al., 2016, 2020). В Восточной группе этого поля умеренно-Mg породы представлены в шлаковом конусе её наиболее северного вулкана – Молабушан и в шлаковом конусе и лавовых потоках вулкана Восточный Лонгменшан средней части этой группы. Низко-Mg составами характеризуются лавовые потоки в основании вулкана Молабушан, все продукты извержений вулкана Западный Лонгменшан и наиболее южного вулкана Восточной группы – Западный Дзяодебушан. Умеренно-Mg породы этих вулканов имеют сравнительно низкое содержание кремнезема (48–51 мас.%) и по-

падают на диаграмме TAS в классификационное поле фонотефрита. Низко-Mg породы характеризуются повышенным содержанием кремнезема (53–55 мас.%) и распределяются на диаграмме TAS в 4 классификационных поля: трахиандезибазальта, трахиандезита, тефрифонолита и фонотефрита (рис. 8).

На вулкане Восточный Дзяодебушан состав трех образцов (СН-15-26, СН-15-27 и СН-15-30) соответствует умеренно-Mg породам. На диаграммах рис. 3 фигуративные точки этих образцов попадают на окончание фигуративного поля умеренно-Mg пород конуса вулкана Молабушан и всего вулкана Восточный Лонгменшан. Фигуративные точки пород низко-Mg состава вулкана Восточный Дзяодебушан частично попадают на окончание фигуративного поля низко-Mg

пород из лавовых потоков в основании вулкана Молабушан, всего вулкана Западный Лонгменшан и всего вулкан Западный Дзяодебушан. Часть фигуративных точек низко-Mg пород вулкана Восточный Дзяодебушан наложена на фигуративное поле низко-Mg пород вулканов Восточной группы, другая часть смещается в сторону умеренно-Mg пород.

На вулкане Сяюгушан породы характеризуются узким диапазоном содержания кремнезема (около 53–54 мас.%). Фигуративные точки пяти пород перекрывают поле пород низко-Mg состава вулканов Восточной группы. Две точки пород из вулканиче-

ских бомб (обр. СН-16-278 и СН-15-05) смещаются в область с повышенным содержанием Mg на диаграмме панели *a* рис. 8, тогда как точка породы лавового потока из основания постройки (обр. СН-16-280) смещается в нижнюю часть этой диаграммы.

В целом, фигуративные точки пород вулкана Восточный Дзяодебушан укладываются в общие тренды пород вулканов Восточной группы, перекрывая пространство между контрастными умеренно- и низко-Mg группами, тогда как фигуративные точки пород вулкана Сяюгушан образуют поперечный тренд относительно низко-Mg группы.

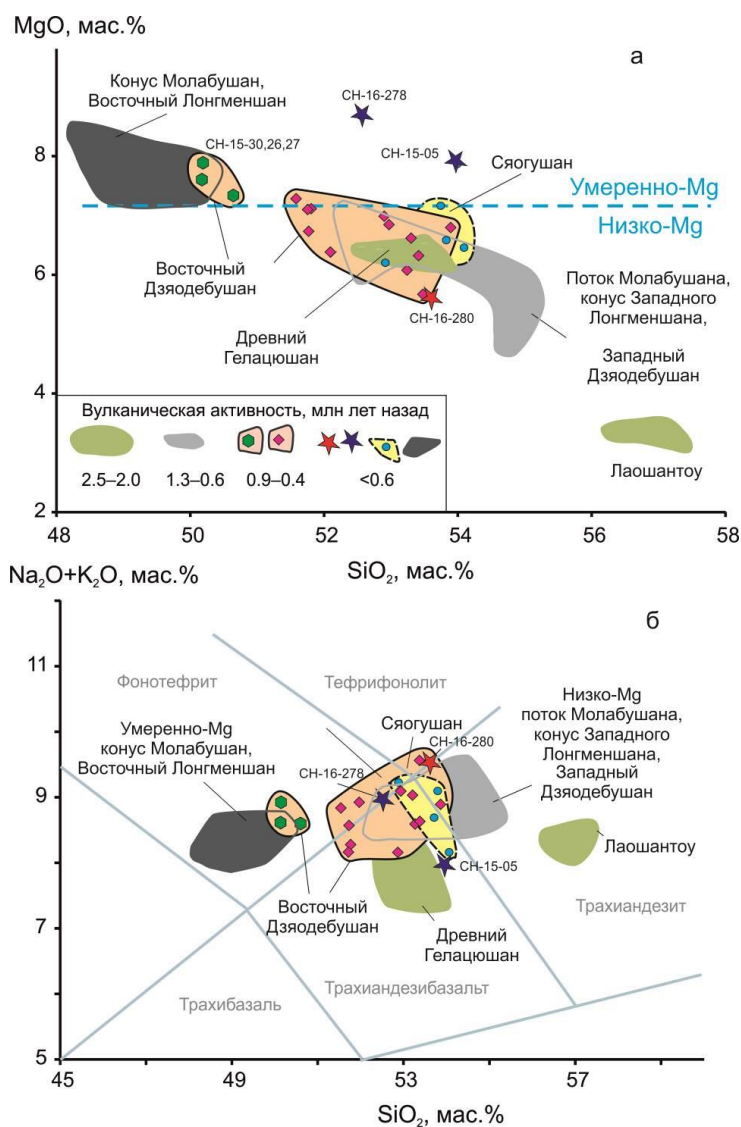


Рис. 8. Диаграммы MgO – SiO₂ (а) и Na₂O+K₂O – SiO₂ (б) пород Восточной группы вулканов Удаляньчи в сравнении с породами из более древних лавовых потоков Лаошантоу и Древний Гелацюшан Центральной и Западной групп. Классификационные поля на диаграмме TAS (total alkalis silica) показаны по работе (Le Bas, Streckeisen, 1991). Химические составы пересчитаны на 100% без учета потерь при прокаливании (ППП). Данные по вулканическим породам Молабушан, Лонгменшан, Лаошантоу и Древний Гелацюшан из работы (Rasskazov et al., 2020).

Fig. 8. Diagrams MgO vs SiO₂ (a) and Na₂O + K₂O vs SiO₂ (b) for rocks from the eastern group of the Wudalianchi volcanoes compared to those from older lava flows. The classification fields of TAS diagram are shown after [Le Bas, Streckeisen, 1991]. Chemical compositions are recalculated to 100% without LOI. Data on the Molabushan, Longmenshan, Laoshantou, and Old Gelaqushan volcanic rocks are from (Rasskazov et al., 2020).

Соотношение Ni и MgO – показатель петрогенетического различия трендов

Петрогенетическое различие трендов рис. 8 отчетливо обозначается на диаграмме Ni – MgO (рис. 9).

Фигуративные точки пород вулкана Восточный Дзяодебушан образуют непрерывный тренд смешения расплавов из источников типа Гелацю и Молабу. Первый из них преобладает в извергнутом материале поля Удаляньчи и впервые проявляется в потоке Древний Гелацюшан. На низко-Mg окончании тренда находятся точки пород наиболее южного вулкана Западный Дзяодебушан, поэтому крайняя точка обр. СН-15-29 Восточного Дзяодебушана обозначается как компонент источника Западного Дзяодебушана. Второй крайний компонент смешения индивидуализируется после 0.6 млн лет назад в извергнутом материале конуса наиболее северного вулкана Молабушан и проявляется в извержениях Восточного Лонгменшана. Этот компонент обозначается

как компонент источника, подобного источнику Молабу.

Фигуративные точки пород вулкана Сяогушан частично ложатся в среднюю часть тренда пород Восточного Дзяодебушана. С учетом более позднего извержения вулкана Сяогушан, эти составы относятся к смешанным. Иными словами, процессы смешения расплавного материала, подобного материалу, извергнутому на вулкане Восточный Дзяодебушан, привели к образованию магм промежуточного состава под вулканом Сяогушан. Эта часть составов, скорее всего, является производной безоливиновых источников. От совокупности точек результирующих составов смешения протягивается тренд контаминации перидотитовым материалом, трассированный фигуративными точками СН-15-05 и СН-16-278 с возрастающими концентрациями MgO и Ni, и противоположный тренд кристаллизационной дифференциации оливина, обозначаемый точкой СН-16-280 с уменьшающимися концентрациями MgO и Ni.

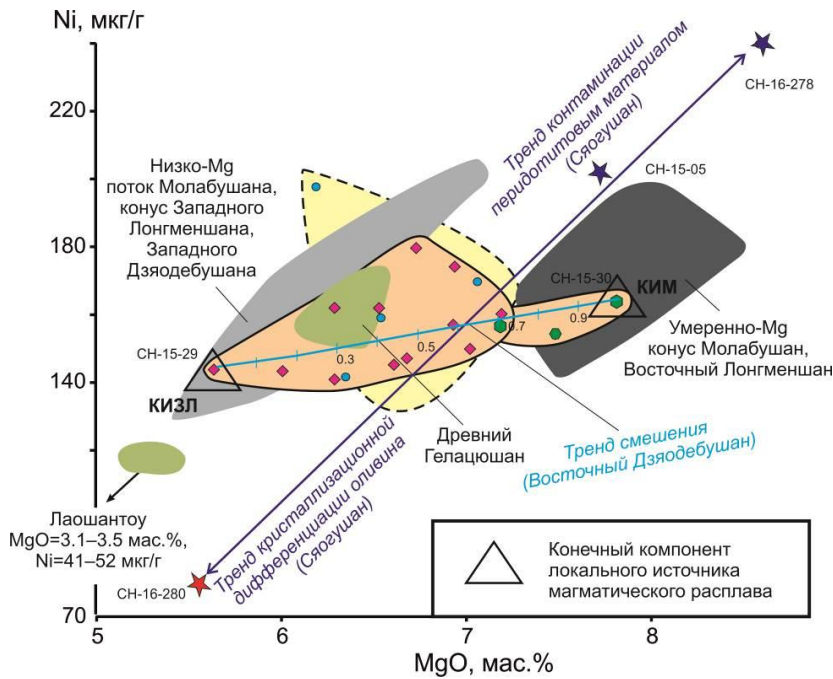


Рис. 9. Диаграмма Ni – MgO пород Восточной группы вулканов Удаляньчи в сравнении с породами из более древних лавовых потоков Лаошантоу и Древний Гелацюшан Центральной и Западной групп. Усл. обозн. см. рис. 8. Дополнительные обозначения: КИЗЛ – компонент источника Западного Лонгменшана, КИМ – компонент источника, подобного источнику Молабу.

Fig. 9. Diagram Ni versus MgO for rocks from the Eastern group of Wudalianchi volcanoes in comparison with those from the older Laoshantou and Old Gelaqiushan lava flows of the Central and Western groups. Symbols are as in Fig. 8. Additional designations: КИЗЛ – component of the Western Longmenshan source, КИМ – component of the Molabu-like source.

Обсуждение

Для изучения природных моделей смешения базальтовых магм перспективны петрогенетические исследования в зонах спрединга. В таких исследованиях на локальных территориях обнаруживается сильная корреляция между микроэлементными и изотопными характеристиками пород (Stracke et al., 2003; Stracke, Bourdon, 2009; Peate et al., 2009; Cordier et al., 2010; Waters et al., 2011). В Исландии выявляется изменение процесса смешения с глубиной; большая степень гомогенизации глубинных расплавов и меньшая степень гомогенизации расплавов малых глубин (Rudge et al., 2013).

Смешение низко- и умеренно-Mg расплавов под вулканом Восточный Дзяодебушан – показатель вулканических извержений во время структурной перестройки

На вулканических полях северо-восточной части Байкальской рифтовой системы, Витимском и Удоканском, были выявлены структурные перестройки, которые сопровождались смешением расплавов контрастного состава (Рассказов, Чувашова, 2018). Механическое смешение контрастных магм на этих полях рассматривалось как показатель времени структурных перестроек. На Витимском поле, в базанитовых и фонотефритовых потоках Береинского центра, находятся линзы тефрифонолитового состава. Неоднородный состав лав свидетельствует о проявлении смешения магматических расплавов в процессе извержений при структурной перестройке около 0.6 млн лет назад,

в результате которой вулканизм Витимского поля угас. На Удоканском поле неполное смешение расплавов контрастного состава маркирует структурные перестройки в Центральной вулканоструктуре около 3.5 млн лет назад, в Северной вулканоструктуре – около 2.6 млн лет назад и в Западной вулканоструктуре – около 9.8–8.78 тыс. лет назад. Извержение вулкана Долинный имеет высокую эксплозивность с выбросом мелкообломочной трахитовой пемзы, местами насыщенной овальными включениями частично раскристаллизованного базитового материала. Такое извержение вызывается резким выделением летучих компонентов, спровоцированным внедрением щелочно-базальтового расплава в малоглубинную трахитовую магматическую камеру при смене напряженного состояния коры.

Пространственно-временные соотношения умеренно- и низко-Mg вулканических пород поля Удаляньчи контролируется развитием субмеридиональной зоны трансформации, активность которой начинается с извержений потоков Лаошантоу и Древний Гелацюшан 2.5–2.0 млн лет назад в ее осевой части. По мере продвижения извержений Центральной группы вулканов с юго-запада на северо-восток зона вулканизма последовательно расширяется на ее обоих флангах через промежуточные фоновые извержения, начавшиеся 1.3–0.8 млн лет назад, к более обширным извержениям Западной и Восточной групп вулканов в последние 0.6 млн лет (рис. 10).

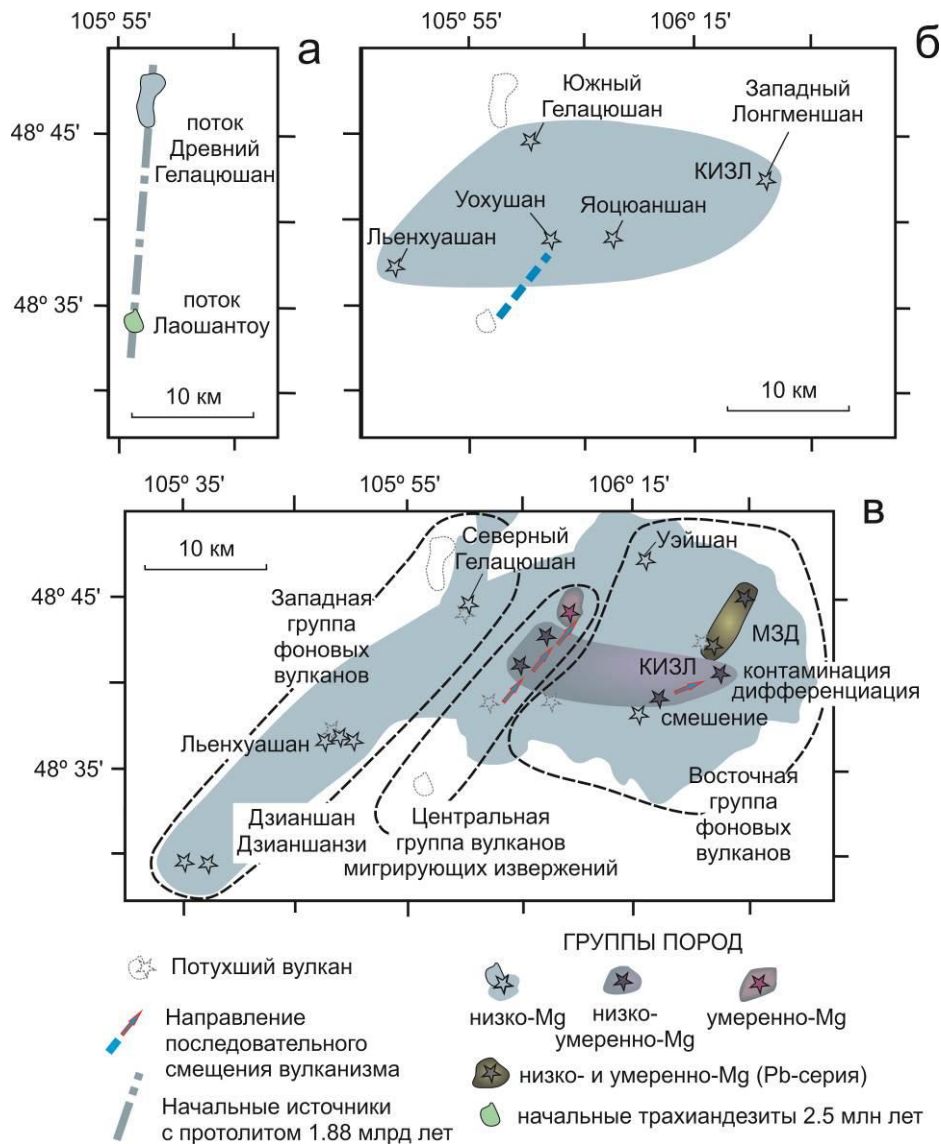


Рис. 11. Пространственное распределение низко- и умеренно-Mg вулканических пород в ходе развития трансенсии на поле Удаляньчи. *а* – начальная стадия 2.5–2.0 млн лет назад, *б* – промежуточная стадия 1.3–0.8 млн лет назад, *в* – продвинутая стадия последних 0.6 млн лет. КИЗЛ – компонент источника Западного Молабушана, КИМ – компонент источника, подобного источнику Молабу. Из работы (Rasskazov et al., 2020) с дополнениями.

Fig. 11. Spatial distribution of low- and moderate-Mg volcanic rocks in the Wudalianchi field. *a* – the initial stage of 2.5–2.0 Myr ago, *b* – the intermediate stage of 1.3–0.8 Myr ago, *c* – the advanced stage of the last 0.6 Myr. КИЗЛ – component of the Western Molabushan source, КИМ – component of the Molabu-like source. Modified after (Rasskazov et al., 2020).

В интервале 2.5–2.0 млн лет назад на поле Удаляньчи извергаются расплавы трахиандезитов и низко-Mg трахиандезибазальтов, в интервале 1.3–0.8 млн лет назад – низко-Mg расплавы, среди которых проявляются более щелочные фонотефриты, а в последние 0.6 млн лет – низко- и умеренно-Mg трахиандезибазальты и фонотефриты. В мигрировавших к северо-востоку извержениях Центральной группы вулканов состав продуктов вулканических извержений меня-

ется от трахиандезитов Лаошантоу через низко-Mg трахиандезибазальты–фонотефриты вулкана Уохушан и ассоциацию низко- и умеренно-Mg трахиандезибазальтов–фонотефритов, разделенных по фазам активности вулканов Бидзиашан и Лаохейшан, к умеренно-Mg трахиандезибазальтам–фонотефритам конуса Хуошаошан (Rasskazov et al., 2016).

Магнезиальность расплавов возрастает с течением времени в ходе эволюции субме-

ридиональной зоны транстенсии. Продукты начальных и промежуточных извержений имеют низко-Mg состав; в продуктах поздних извержений проявляются расплавы умеренно-Mg состава. По отношению к начальным извержениям, максимальный контраст достигается в мигрировавших извержениях Центральной группы на вулкане Хуошаошан и в фоновых извержениях Восточной группы на вулканах Лонгменшан и Молабушан.

Ранние фоновые вулканы поля Удаляньчи характеризуются в целом преобладающим низко-Mg составом. В Восточной группе к ним относятся вулканы Западный Дзяодебушан и Западный Лонгменшан. Низко- и умеренно-Mg породы поздних вулканов Лонгменшан и Молабушан разделены между собой по фазам активности. Низко-Mg породы находятся не только в западном конусе вулкана Лонгменшан, но и в потоке вулкана Молабушан. Умеренно-Mg породы характеризуют конусы вулканов Молабушан и Восточный Лонгменшан.

По представленным в настоящей работе данным вулканы Восточный Дзяодебушан и Сяогушан Восточной группы отличаются от других вулканов этой группы совместным проявлением в извержениях низко- и умеренно-Mg магматических расплавов. С одной стороны, смешанная ассоциация таких пород вулканов Восточный Дзяодебушан и Сяогушан находится между конусами ранних вулканов низко-Mg пород Западный Дзяодебушан и Западный Лонгменшан. С другой стороны, эти вулканы со смешанной ассоциацией пород сменяются к северу вулканами Восточный Лонгменшан и Молабушан с индивидуализированными извержениями умеренно-Mg магм.

Смещение по времени вулканической активности от Восточного Дзяодебушана к Сяогушану отражается в различном петрогенезисе продуктов извержений. Под Восточным Дзяодебушаном, извергающемся раньше, смешиваются контрастные магматические расплавы, под вулканом Сяогушан – уже смешанные расплавы промежуточного состава контаминируются перидотитовым материалом и фракционируют с отделением оливина. Смещение извержения вулкана Сяогушан на 6 км к востоку-северо-востоку,

относительно постройки Восточного Дзяодебушана, в общем, совпадает с направлением смещения извержений в Центральной группе вулканов с юго-запада на северо-восток. Скачок извержений от постройки Дзяодебушан к постройке Сяогушан Восточной группы соответствует скачку извержений от постройки Уошушан к постройке Бидзиашан Центральной группы около 0.4 млн лет назад.

Фактически, в Восточной группе вулканов проявляется процесс пространственно-временной смены состава магматических расплавов, ярко выраженный в Центральной группе вулканов. Контрастные расплавы смешиваются при перестройке глубинной магматической системы около 0.6 млн лет назад (до 0.4 млн лет назад), в результате которой к низко-Mg магмам присоединяются магмы умеренно-Mg состава.

Принадлежность расплавов к источникам разновозрастных протолитов

По изотопным отношениям Pb, протолиты источников разных вулканов поля Удаляньчи имеют разный возраст. Во временном интервале 2.5–2.0 млн лет назад в Центральной и Западной группах вулканов активизируются литосферные источники, (соответственно, Лаошантоу и Гелацю) с Pb-изотопным возрастом протолита 1.88 млрд лет. Затем, 1.3–0.4 млн лет назад, а на вулкане Уошушан извергается материал из источника Уошу с Pb-изотопным возрастом протолита около 0.15 млрд лет, стартующим около 150 млн лет назад от источника Гелацю. В последние 0.6 млн лет проявляют активность источники Хуо и Молабу с более молодыми протолитами (100 млн лет и четвертичным) (Rasskazov et al., 2016, 2020).

На изохронной диаграмме Pb пять фигуративных точек низко-Mg пород вулкана Восточный Дзяодебушан и все точки низко-Mg пород вулкана Сяогушан концентрируются в компактном фигуративном поле, перекрывающем составы Pb низко-Mg пород Западного Лонгменшана, близкого по Pb-изотопным характеристикам к источнику Гелацю. Протолит этого источника (КИЗЛ), вероятно, формировался на основе протолита источника Гелацю в комплементарном

соотношении с протолитом источника низко-Mg пород потока Молабушан. U и Pb могли перераспределяться из протолита Гелацю флюидами с относительным обогащением и обеднением этими элементами.

Часть точек низко-Mg пород вулкана Восточный Дзяодебушан и три точки умеренно-Mg пород этого вулкана смещаются вправо, вдоль линии молодого источника Хуо. Точки умеренно-Mg пород Восточного Дзяодебушана сопоставляются по интервалу отношения $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ с породами из четвертичного источника Молабу. Точки, рассеянные выше линии источнику Хуо, могут принадлежать источнику Уоуху.

Мы видим, что породы вулкана Сяюгушан являются производными протолита источника, подобного протолиту с наименее

радиогенным Pb источника низко-Mg пород Восточного Дзяодебушана. Ограниченный диапазон Pb пород Сяюгушана свидетельствует о поступлении расплавов опробованной южной части постройки из ограниченной области протолита КИЗЛ. Точка породы с повышенным содержанием MgO (обр. СН-15-05) вулкана Сяюгушан лишь слегка смещается ниже поля низко-Mg пород этого вулкана. Точка дифференцированной породы из потока в основании этого вулкана (обр. СН-16-280) сильно сдвинута вдоль линии источников Лаошантоу и Гелацю. Такой сдвиг свидетельствует о контаминации расплавов вулкана Сяюгушан материалом древнего протолита, подобного материалу протолитов этих источников (рис. 12).

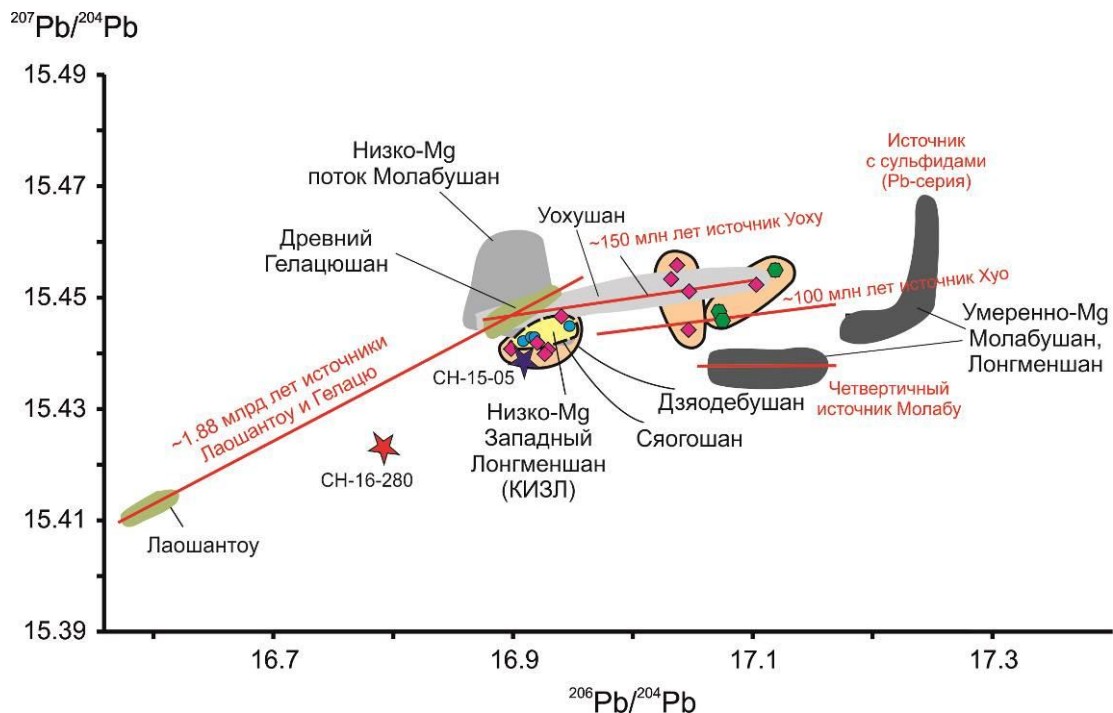


Рис. 12. Диаграмма отношений $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ для пород восточной группы вулканов Удаляньчи в сравнении с породами из более древних лавовых потоков.

Fig. 12. Diagram of $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ratios for rocks from the Eastern group of the Wudalianchi volcanoes compared to those from older lava flows.

Заключение

На вулканическом поле Удаляньчи Северо-Восточного Китая установлены факты механического смешения расплавов контрастного состава в продуктах извержений вулканов Восточный Дзяодебушан и Сяюгушан. Эти вулканы принадлежат Восточной группе. Первый извергался в интервале

0.87–0.43 млн лет назад, второй – 0.38–0.24 млн лет назад. Из возрастных соотношений вулканов следует, что процесс смешения контрастных магм сначала имел место под Восточным Дзяодебушаном, затем – под Сяюгушаном с контаминацией кристаллическим перидотитовым материалом и кристаллизационным фракционированием. Смещение извержения вулкана Сяюгушан на 6 км к

востоку-северо-востоку, относительно вулкана Восточного Дзяодебушана, в общем соответствовало направлению смещения извержений в Центральной группе вулканов с юго-запада на северо-восток. Скачок извержений от постройки Дзяодебушан к постройке Сяогушан соответствовал скачку извержений от постройки Уохушан к постройке Бидзиашан около 0.4 млн лет назад.

На основе полученных Рb-изотопных характеристик предполагается, что расплавы Восточного Дзяодебушана извергались в результате плавления разновозрастных (преимущественно молодых) протолитов и могли взаимно смешиваться под этим вулканом, тогда как расплавы Сяогушана были загрязнены кристаллическим материалом древних перидотитов. На обоих вулканах смешивались расплавы, поступающие из модифицированной части источника Гелацю (КИЗЛ). Под вулканом Восточный Дзяодебушан в плавление дополнительно вовлекались протолиты, подобные протолитам источников Уоху и Хуо. Рb-изотопный состав умеренно-Mg расплавов Восточного Дзяодебушана несколько отличался от состава четвертичного источника Молабу.

Смешение расплавов явилось следствием перестройки глубинной магматической системы, охватившей интервал, судя по имеющимся К–Аг датировкам, от 0.9 до 0.2 млн лет назад. Прецизионные геохронометрические определения активности вулканов могут сократить этот интервал и дать более точную оценку перестройки глубинной магматической системы под вулканами Восточной группы.

Благодарности

Работа выполнена в Китайско-Российском исследовательском центре Удаляньчи-Байкал по вулканизму и окружающей среде. Методические подходы к анализу источников вулканических пород частично разработаны при выполнении госзадания ИЗК СО РАН на 2021–2025 гг. «Современная геодинамика, механизмы деструкции литосферы и опасные геологические процессы в Центральной Азии» (FWEF-2021-0009). Петрогенные оксиды определялись химиками-аналитиками Г.В. Бондаревой и

М.М. Самойленко в ИЗК СО РАН, масс-спектрометрические измерения изотопов Рb – Н.С. Герасимовым на приборе MS-ICP-MS Neptune Plus в геохимическом ЦКП Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, состав микроэлементов – методом ИСП-МС на масс-спектрометре Agilent 7500se в ЦКП Лимнологического института «Ультрамикроанализ» А.П. Чебыкиным.

Литература

Рассказов С.В. Базальтоиды Удокана. Новосибирск: Наука, 1985. 142 с.

Рассказов С.В., Чувашова И.С. Вулканизм и трансенсия на северо-востоке Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2018. 384 с.

Сизых Ю.И. Общая схема химического анализа горных пород и минералов. Отчет. Институт земной коры СО АН СССР. Иркутск, 1985. 50 с.

Ясныгина Т.А., Маркова М.Е., Рассказов С.В., Пахомова Н.Н. Определение редкоземельных элементов, Y, Zr, Nb, Hf, Ta, Ti в стандартных образцах серии ДВ методом ИСП-МС // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81, № 2. С. 10–20.

Blake D.H., Biwell R.W., Gibson I.L. et al. Some relationship resulting from the intimate association of acid and basic magmas // Quart. J. Geol. Soc. Lond. 1965. V. 121, pt. 1. P. 31–49.

Cordier C., Benoit M., He'mond C., Dymont J., Le Gall B., Briais A., Kitazawa M. Time scales of melt extraction revealed by distribution of lava composition across a ridge axis // Geochem. Geophys. Geosyst. 2010. Vol. 11. <http://dx.doi.org/10.1029/2010GC003074>.

Guide book for field mission to Wudalianchi National Park, China. Prepared by Wudalianchi National Park and Nature Management Committee Heilongjiang province. 2010. 50 p.

Le Bas M.J., Streckeisen A.L. The IUGS systematics of igneous rocks // J. Geol. Soc. London. 1991. V. 148. P. 825–833.

Liu J., Han J., Fyfe W.S. Cenozoic episodic volcanism and continental rifting in northeast China and possible link to Japan Sea development as revealed from K–Ar geochronology // Tectonophysics. 2001. Vol. 339. P. 385–401. <http://dx.doi.org/10.1016/J.TECTO.2004.07.029>

- Liu J., Taniguchi H. Active volcanoes in China // *Northeast Asian Studies*. 2001. Vol. 6. P. 173–189.
- Peate D.W., Baker J.A., Jakobsson S.P., Waight T.E., Kent A. J.R., Grassineau N.V., Skovgaard A.C. Historic magmatism on the Reykjanes Peninsula, Iceland: A snap-shot of melt generation at a ridge segment // *Contrib. Miner. Petrol.* 2009. Vol. 157. P. 359–382. <http://dx.doi.org/10.1007/s00410-008-0339-4>
- Rasskazov S., Sun Y-M., Chuvashova I., Yasnygina T., Yang C., Xie Z., Saranina E., Gerasimov N., Vladimirova T. Trace-element and Pb isotope evidence on extracting sulfides from potassic melts beneath Longmenshan and Molabushan volcanoes, Wudalianchi, Northeast China. *Minerals*. 2020. V. 10: 319; doi:10.3390/min10040319
- Rasskazov S. V., Chuvashova I. S., Sun Yi-min, Yang Chen, Xie Zhenhua, Yasnygina T. A., Saranina E. V., Zhengxing Fang Sources of Quaternary potassic volcanic rocks from Wudalianchi, China: Control by transtension at the lithosphere–asthenosphere boundary layer // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2016. Vol. 7, No. 4. P. 495–532.
- Rudge J.F., MacLennan J., Stracke A. The geochemical consequences of mixing melts from a heterogeneous mantle // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2013. Vol. 114. P. 112–143.
- Sethna S.P., Battiwala H.K. Hybridization effects in contemporaneous eruption of trachytic and basaltic magmas in Salsette, Bombay // *N. Jb. Mineral. Mh.* 1976. № 11. P. 495–507.
- Stracke A., Zindler A., Salters V., McKenzie D., Blichert-Toft J., Albarede F., Gronvold K. Theistareykir revisited // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2003. Vol. 4. P. 8507. <http://dx.doi.org/10.1029/2001GC000201>.
- Stracke A., Bourdon B. The importance of melt extraction for tracing mantle heterogeneity // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2009. Vol. 73. P. 218–238. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2008.10.015>.
- Sundermeyer C., Gätjen J., Weimann L., Wörner G. Timescales from magma mixing to eruption in alkaline volcanism in the Eifel volcanic fields, western Germany // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2020. Vol. 175. P. 77. <https://doi.org/10.1007/s00410-020-01715-y>
- Wang Y., Chen H. Tectonic controls on the Pleistocene-Holocene Wudalianchi volcanic field (northeastern China) // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2005. Vol. 24. P. 419–431.
- Wang Y., Mu L., Liu W. Regularity and characteristic of volcanic activity at Wudalianchi, Heilongjiang // 30th International Geological Congress. Beijing, China, 1996. 14 p.
- Waters C.L., Sims K.W.W., Perfit M.R., Blichert-Toft J., Blusztajn J. Perspective on the genesis of E-MORB from chemical and isotopic heterogeneity at 9–10 N East Pacific rise // *J. Petrol.* 2011. Vol. 52. P. 565–602. <http://dx.doi.org/10.1093/petrology/egq091>.
- Yoder H.S.J. Contemporaneous basaltic and rhyolitic magmas // *Am. Mineral.* 1973. V. 58, № 3–4. P. 153–171.
- Zhang M., Suddaby P., Thompson R.N. et al. Potassic rocks in NE China: geochemical constraints on mantle source and magma genesis // *J. Petrology*. 1995. Vol. 36, No. 5. P. 1275–1303.
- Zhao Y-W., Li Ni., Fan Q-C., Zou H., Xu Y-G. Two episodes of volcanism in the Wudalianchi volcanic belt, NE China: Evidence for tectonic controls on volcanic activities // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2014. Vol. 285. P. 170–179. dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.08.016.

References

Rasskazov S.V. Basaltoids of Udokan. Novosibirsk: Nauka, 1985. 142 p.

Rasskazov S.V., Chuvashova I.S. Volcanism and transtension in the northeast of the Baikal rift system. Novosibirsk: Academic Publishing House "Geo", 2018. 384 p.

Sizykh Yu.I. General scheme of chemical analysis of rocks and minerals. Report. Institute of the Earth's Crust Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. Irkutsk, 1985. 50 p.

Yasnygina T.A., Markova M.E., Rasskazov S.V., Pakhomova N.N. Determination of rare earth elements, Y, Zr, Nb, Hf, Ta, Ti in standard samples of the DV series by ICP-MS // *Factory Laboratory. Diagnostics of materials*. 2015. Vol. 81, No. 2. P. 10–20.

Чувашова Ирина Сергеевна,

кандидат геолого-минералогических наук,

664025 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет, геологический факультет,

доцент кафедры динамической геологии,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
старший научный сотрудник,
тел.: (3952) 51-16-59,
email: chuvashova@crust.irk.ru.

Chuvashova Irina Sergeevna,
candidate of geological and mineralogical sciences, Senior Researcher,
664025 Irkutsk, Lenin st., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Associate Professor of the Dynamic Geology chair,
664033 Irkutsk, Lermontov st., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Senior Researcher,
tel.: (3952) 51-16-59,
email: chuvashova@crust.irk.ru.

Сунь И-мин,
Научный сотрудник,
Институт природных ресурсов и экологии Хэйлуцзянской академии наук, Харбин, Китай.
Sun Yi-min,
Research scientist,
Institute of Natural Resources and Ecology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin, China,
e-mail: 894817259@qq.com.

Рассказов Сергей Васильевич,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
664025 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет, геологический факультет,
заведующий кафедрой динамической геологии,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
заведующий лабораторией изотопии и геохронологии,
тел.: (3952) 51-16-59,
email: rassk@crust.irk.ru.

Rasskazov Sergei Vasilievich,
doctor of geological and mineralogical sciences, professor,
664025 Irkutsk, Lenin st., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Head of Dynamic Geology Char,
664033 Irkutsk, Lermontov st., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Head of Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies,
tel.: (3952) 51-16-59,
email: rassk@crust.irk.ru.

Ясныгина Татьяна Александровна,
кандидат геолого-минералогических наук,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
старший научный сотрудник,
тел.: (3952) 51-16-59,
email: ty@crust.irk.ru.

Yasnygina Tatyana Alexandrovna,
candidate of geological and mineralogical sciences, Senior Researcher,
664033 Irkutsk, Lermontov st., 128,

*Institute of the Earth's Crust SB RAS,
tel.: (3952) 51-16-59,
email: ty@crust.irk.ru.*

Саранина Елена Владимировна,
*кандидат геолого-минералогических наук,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
ведущий инженер,
664033 Иркутск, ул. Фаворского, д. 1 "А",
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
email: e_v_sar@mail.ru.*

Saranina Elena Vladimirovna,
*candidate of geological and mineralogical sciences,
664033 Irkutsk, st. Lermontova, 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Lead Engineer,
664033 Irkutsk, st. Favorskogo, 1 "A",
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
email: e_v_sar@mail.ru.*
