

Индикаторная роль щелочно-базальтоидного вулканизма и вихревой геодинамики в происхождении алмазов нетрадиционного типа Западно-тихоокеанской зоны перехода континент–океан

©2023 Т. А. Емельянова[✉], Н. С. Ли, Ю. И. Мельниченко

*Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН,
ул. Балтийская, 43, 690041, Владивосток, Российская Федерация*

Посвящается памяти Л. А. Изосова

Аннотация

Введение: Впервые поставлен вопрос о перспективности в отношении алмазов нетрадиционного генезиса Западно-Тихоокеанской зоны перехода. В кайнозой тектономагматическая активизация зоны перехода осуществлялась под воздействием нижнемантийных плюмов – апофиз Африканского и Тихоокеанского суперплюмов, адиабатическое плавление, которых приводило к вспышкам WPB вулканизма САВ и ОИВ-типа, соответственно. Плюмовый апвеллинг способствовал выносу алмазов из зоны их устойчивости. Источником углерода служили карбонатные толщи субдуцирующей плиты или сверхглубинные водородно-метановые газы, поднимающиеся от границы ядро–нижняя мантия.

Методика: Методы исследования заключались в выявлении разломов и структур центрального типа. Определения радиоизотопного возраста, петролого-геохимического состава и радиогенных изотопов Pb, Nd и Sr проводились в аналитических центрах России, Германии и США.

Результаты и обсуждение: Петролого-геохимические свойства щелочных базальтоидов указывают на принадлежность САВ- и ОИВ-типов вулканизма, главным образом, к тефрит-лейцитовый, камафугитовой и лампроитовой сериям, что может служить одним из критериев потенциальной алмазности этой зоны. К другим критериям относятся: 1) наличие древнего фундамента и ослабленного тектонического каркаса зоны перехода; 2) вихревая геодинамика, способствовавшая затягиванию алмазосодержащих мантийных расплавов в циклонические и антициклонические вихри.

Выводы: Окраинные моря и участки окружающей суши можно отнести к объектам, перспективным на обнаружение мелких алмазов в местах проявления ОИВ вулканизма, а более масштабных скоплений крупных кристаллов в областях активизации древних платформ и проявления САВ вулканизма.

Ключевые слова: окраинные моря, плюмтектоника, кимберлиты, лампроиты.

Источник финансирования: Работа выполнена в рамках госзадания ТОИ ДВО РАН (Рег. № 121021700342-9, № 121021500055-0, № ААА-А19-119122090009-2).

Для цитирования: Емельянова Т. А., Ли Н. С., Мельниченко Ю. И. Индикаторная роль щелочно-базальтоидного вулканизма и вихревой геодинамики в происхождении алмазов нетрадиционного типа Западно-тихоокеанской зоны перехода континент–океан // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2023. № 2. С. 4–18. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/2/4-18>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

[✉] Емельянова Татьяна Андреевна, e-mail: emelyanova@poi.dvo.ru

Введение

Проблема происхождения алмазов всегда привлекала внимание отечественных и зарубежных исследователей. Долгое время их генезис связывался с кимберлитовым магматизмом (трубками взрыва) архейско-протерозойского возраста. Однако в 70–80-х годах прошлого столетия было открыто крупнейшее месторождение алмазов на западе Австралии, связанное с мезо-кайнозойским лампроитовым магматизмом, а в 90-х годах установлены лампрофировые алмазоносные дайки на северо-западе побережья Гудзона залива [1]. В этой связи открылись перспективы обнаружения алмазных проявлений некимберлитового генезиса. Появилось несколько точек зрения на происхождение алмазов. Долгое время доминировали две из них: субдукционная с участием экзогенного углерода (эклогитовый парагенезис) и мантийная с участием расплавов, пересыщенных углеродом (перидотитовый парагенезис) [2–4 и др.]. В рамках концепции плюмтектоники алмазообразование стали связывать с глубинными процессами на границе ядро–нижняя мантия (слой D") и формированием плюмов [5–9 и др.].

Лампроиты являются высококальциевыми и высокомагнезиальными образованиями, включающими оливиновые, лейцитовые и санидиновые разновидности, и могут быть близки к кимберлитам, пикритам, щелочным меласиенитам, фондитам и, что очень важно, к щелочным базальтоидам [3, 6, 10 и др.]. Щелочно-базальтоидный вулканизм широко проявлен в Западно-Тихоокеанской зоне перехода как в окраинных морях, так и в пределах окружающей суши. Многолетнее изучение щелочных базальтоидов [11–13 и др.], наряду с исследованиями в целом геологии Восточной Евразии, выявили ряд закономерностей [14 и др.] и позволили впервые поставить вопрос об алмазоносности переходных зон континент–океан как уникальных геологических структур. Одной из причин, побудивших авторов к исследованию этого вопроса, стало открытие в пределах Япономорского региона лейцитовых анкаратритов и анкаратрит-пикритов Лесозаводской трубки взрыва и Угловско-Артемовских вулканов, сравнимых с Западно-Австралийскими юрскими и миоценовыми алмазоносными лампроитами и кимберлитоподобными породами [14 и др.].

Исходные данные

Исходными данными послужили авторские материалы по геологии, геофизики, геотектонике, геодинамике и вулканизму окраинных морей и всего Япономорского региона, а также литературные источники по вулканизму Берингова, Восточно- и Южно-Китайского морей, Юго-Восточного Китая, Вьетнама, Кореи и, как исключение, островов Полинезии, хотя они не относятся к зоне перехода (рис. 1).

В вопросе транспортировки магматических расплавов, содержащих алмазы или алмазоносные включения, большое значение имеют исследования текто-

номагматических процессов, связанных с происхождением окраинных морей и окружающих их материковых структур. Из множества точек зрения наибольший интерес, на наш взгляд, представляют модели, которые рассматриваются с позиций «вихревой» гипотезы [15, 23–27 и др.]. Авторами была опубликована одна из таких моделей, получившая математическое обоснование [24]. Она основывается на взаимодействии Евразийской и Тихоокеанской литосферных плит. Их движение относительно друг друга характеризуется разнонаправленностью, изменением скорости и угла наклона субдуцирующей океанической плиты. Это провоцирует в вязких слоях мантии циклонические восходящие и антициклонические нисходящие вихри: первые способствуют мантийному апвеллингу, вторые формируют тектоносферные воронки. Это приводит к образованию глубоководных впадин морей.

В кайнозое вихревые процессы накладывались на более древние кольцевые структуры восточной Евразии [11, 25, 28 и др.], докембрийский возраст фундамента которой подтвержден определениями двухстадийного модельного возраста в пределах о-ва Хонсю (0.80 млрд лет) и подводного хребта Витязя (0.77 млрд лет) [29].

Мантийный апвеллинг в окраинных морях и окружающей суши фиксируется в ряде гравитационных реологических 3D-моделях плотностной контрастности [22 и др.] и подтверждается изотопно-геохимической спецификой позднекайнозойского вулканизма. Например, на нижнемантийный плюмогенез в Японском море указывают два типа вулканизма плюмокеанического (ОИВ-тип) в котловинах Центральной и Ямато и плюм-континентального (САВ-тип) в Цусимской котловине [12 и др.]. Аналогичные типы вулканизма, установленные согласно классификации WPB вулканизма континентов и океанов [30], выявлены и в других окраинных морях и прилегающих к ним структурах зоны перехода.

Мантийный апвеллинг мог транспортировать алмазосодержащие мантийные включения и способствовать их «затягиванию» в ослабленные и подвижные зоны. Особенно благоприятным для алмазных проявлений является локализация вихревых структур в областях с докембрийским фундаментом, как это имеет место в Желтом море в районе Ляодунского полуострова (рис. 1) [14]. В связи с близостью полуострова к Япономорскому региону в Приморском крае авторами были проведены исследования, в результате которых установлены геотектонические, структурные, магматические и минералогические предпосылки прогнозирования месторождения алмазов, особенно в пределах Лесозаводской трубки взрыва, Кировского и Угловско-Артемовских вулканов (рис. 1).

Методы исследования заключались в выявлении разломов и структур центрального типа (СЦТ) с применением линеаментного анализа. В качестве основы построений 3D моделей СЦТ использован

мировой каталог гравиметрических данных (Land Gravity data). Определения радиоизотопного возраста, петролого-геохимического состава и радиогенных изотопов Pb, Nd и Sr в щелочных базальто-

идах ОИВ и САВ-типов проводились в аналитических центрах России, Германии и США. Все методы подробно описаны в предыдущих публикациях авторов.

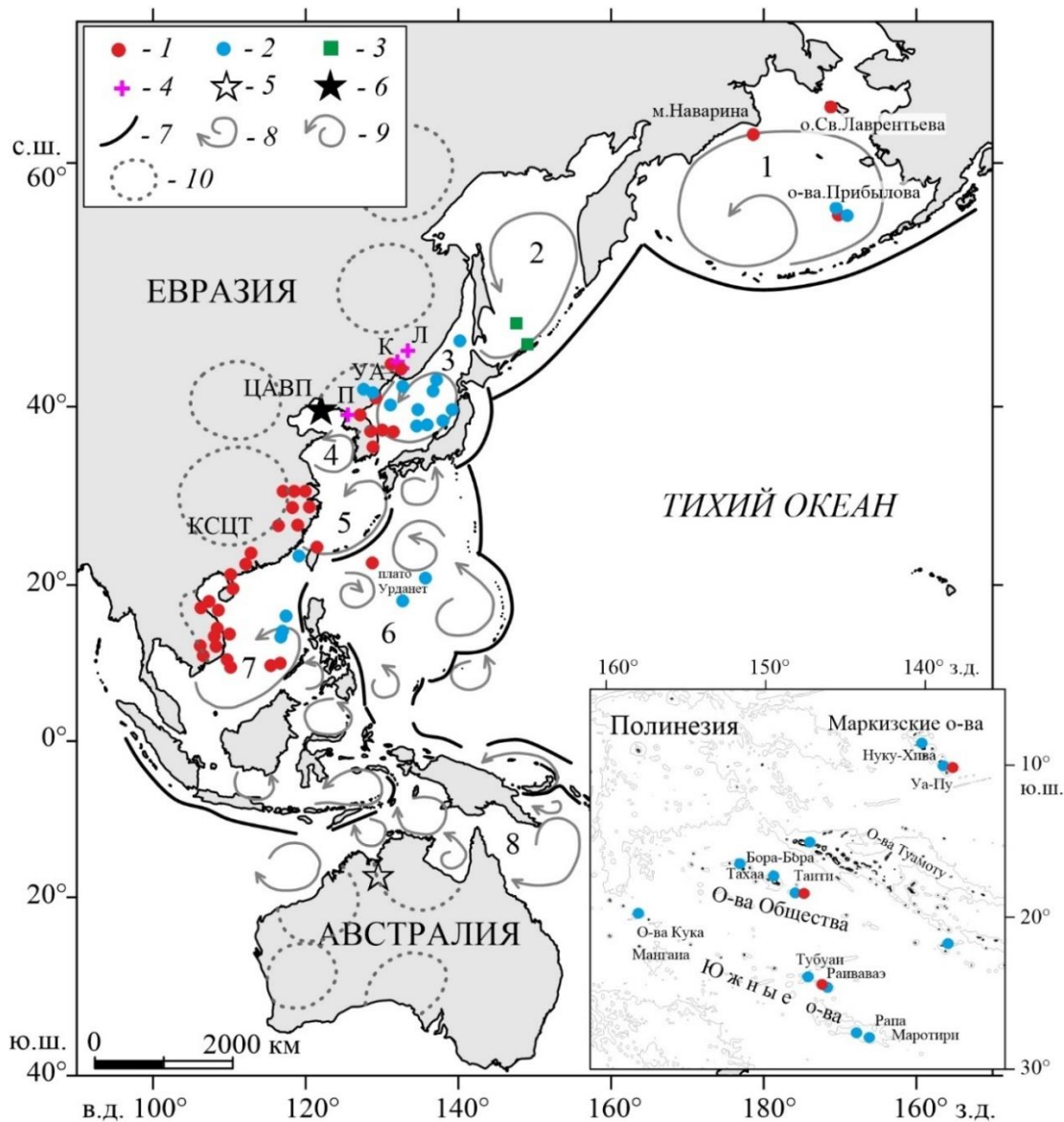


Рис. 1. Схема Западно-Тихоокеанской зоны перехода [по 15 с изменениями] с проявлениями кайнозойского щелочно-базальтоидного вулканизма [12, 16–19]: 1 – плюм-континентального (САВ-тип – continental alkaline basalt), 2 – плюм-океанического (ОИВ-тип); 3 – трахитоидные вулканиды Охотского моря; 4 – лейцитовые и нефелиновые базальты и пикробазальты: Л – Лесозаводской трубки взрыва, К – Кировского вулкана, УА – Угловско-Артемовской группы вулканов; П – кимберлитовиды провинции Пакчхон (Корея); 5 – алмазоносные лампроиты Западной Австралии; 6 – месторождение алмазов Ляодунского полуострова (Китай); 7 – глубоководные желоба; 8, 9 – стрелки указывают направление вращения циклонических (8) и антициклонических (9) литосферных вихрей; 10 – нуклеары. ЦАВП – Центрально-Азиатская внутриплитная провинция – Северо-Азиатский суперплюм [20, 21]; КСЦТ – Катазийская структура центрального типа [22]. Цифрами обозначены окраинные моря: 1 – Берингово, 2 – Охотское, 3 – Японское, 4 – Желтое, 5 – Восточно-Китайское, 6 – Филиппинское, 7 – Южно-Китайское, 8 – Кораллово.

[Fig. 1. Scheme of the West Pacific transition zone [according to 15 with changes] with manifestations of Cenozoic alkaline-basaltoid volcanism [12, 16–19]: (1) – continental plume (CAB-type – continental alkaline basalt), (2) – plume-oceanic (OIB-type); (3) – trachytoid volcanic rocks of the Sea of Okhotsk; (4) – leucite and nepheline basalts and picobasalts: L - Lesozavodsk pipe for the explosion, K - Kirovsk volcano, UA - Uglovsk-Artemovska group of volcanoes; (P) kimberlithoids of Pakchon Province (Korea); (5) – diamondiferous lamproites of Western Australia; (6) – diamond deposit of the Liaodong Peninsula (China); (7) – deep-sea trenches; (8, 9) – arrows indicate the direction of rotation of cyclonic (8) and anticyclonic (9) lithospheric vortices; (10) – nuclears. CAVP, Central Asian intraplate province, North Asian superplume [20, 21]; CSCT - Casian structure of the central type [22]. The numbers indicate the marginal seas: (1) – Bering, (2) - Okhotsk, (3) – Japanese, (4) – Yellow, (5) – East China, (6) - Philippine, (7) - South China (8) – Coral.]

Результаты исследований

В данной статье акцент сделан на анализ изотопно-геохимических свойств широко проявленного в зоне перехода внутриплитного щелочно-базальтоидного вулканизма САВ и ОИВ-типа, играющего одну из главных индикаторных ролей в алмазопрогнозировании, а также на корреляцию его с лампроитовым и кимберлитовым вулканизмом Австралии и Якутии, с которым связаны коренные и россыпные месторождения алмазов.

В Беринговом море (рис. 1) щелочно-базальтоидный вулканизм САВ-типа установлен в Наваринской котловине и на о-ве Св. Лаврентия, а ОИВ-типа – на подводном хребте Прибылова [18 и др.]. Пер-

вый тип представлен плейстоценовыми щелочными оливиновыми базальтами, базанитами и нефелинитами, второй – щелочными оливин-клинопироксеновыми базальтоидами и нефелинитами. Все породы характеризуются высокой щелочностью (рис. 2а), Та-Nb максимумом (рис. 3а), преобладанием высокозарядных элементов над крупноионными литофильными ($HFSE/LILE > 1$), легких редкоземельных над тяжелыми (LREE над HREE). Отнесение базальтоидов к САВ или ОИВ типу иллюстрирует диаграмма Hf-Ta-Th [18], а именно расположение первых в поле WPB, а вторых – в поле WPB+E-MORB и в области ОИВ на диаграмме (Zr/Y)-(Nb/Y) (рис. 4).

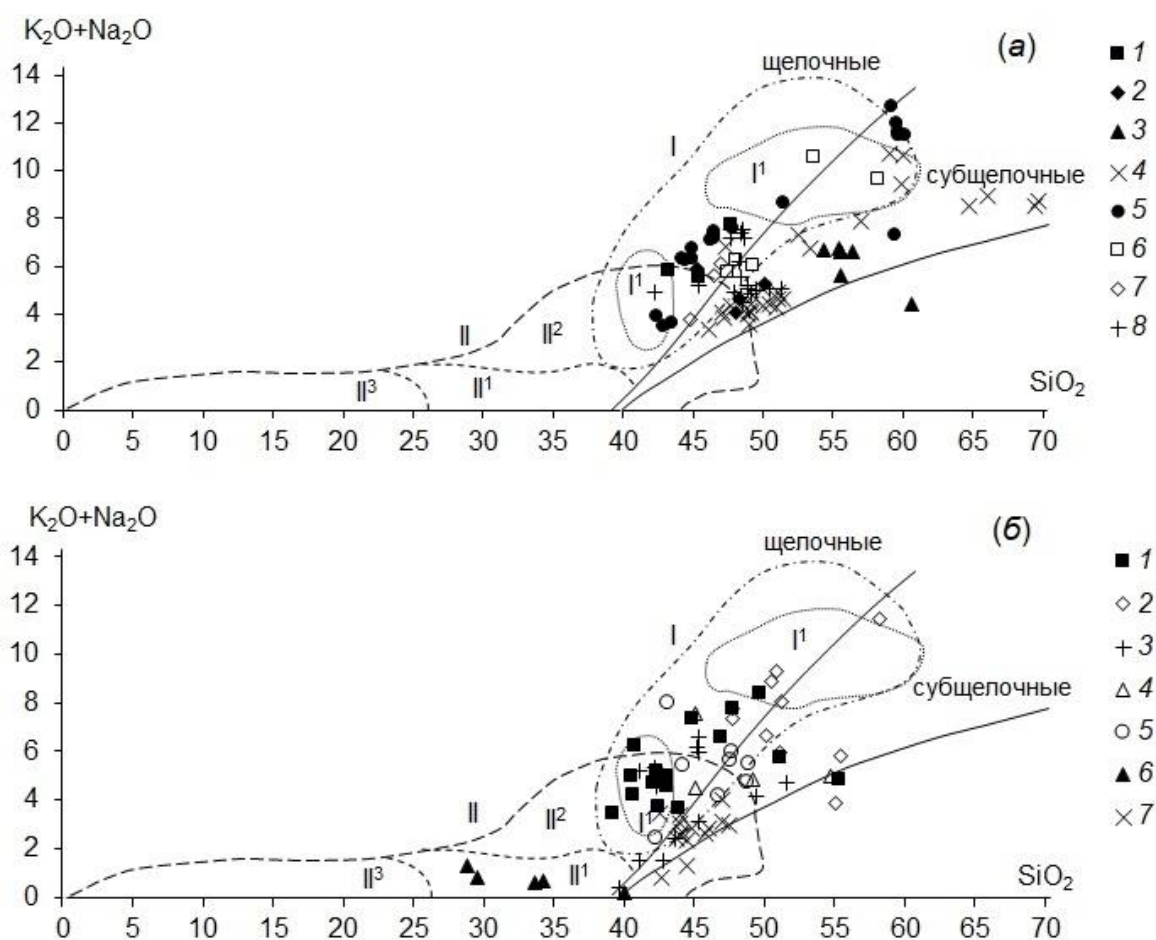


Рис. 2. Диаграмма щелочи-кремнезем для щелочных базальтоидов. Окраинные моря (а). 1, 2 – Берингово море [18]: САВ-тип (1), ОИВ-тип (2); 3 – Охотское море – трахитоиды ОИВ+АМСВ-тип [12 и др.]; 4, 5 – Японское море [11, 12]: ОИВ-тип (4), САВ-тип (5); 6 – Филиппинское море [31]; 7 – Восточно-Китайское море и 8 – Южно-Китайское море [17, 18]. Районы прилегающей суши (б). Приморье [14]: 1 – Кировский вулкан, 2 – Угловско-Артемовские вулканы, 3 – Лесозаводская трубка взрыва, 4 – Вьетнам и 5 – Юго-Восточный Китай [17, 18], 6 – Корея [14], 7 – острова Полинезии [16]. Ореолы обозначены поля по [32]: I – общее поле лампроитовой серии, I¹ – лампроиты Западной Австралии, II – общее поле кимберлитовой серии, II¹ – кимберлиты базальтоидные, II² – кимберлиты слюдяные, II³ – кимберлиты кальцитовые.

[Fig. 2. Alkali-silica diagram for alkaline basalts. Marginal seas (a). (1, 2 – Bering Sea [18]: CAB type (1), OIB-type (2); (3) – Sea of Okhotsk – OIB+AMCB-type trachytoids [12, etc.]; (4, 5) – Sea of Japan [11, 12]: OIB-type (4), CAB-type (5); (6) – Philippine Sea [31]; (7) – East China Sea and (8) – South China Sea [17, 18]. Areas of adjacent land (b). Primorye [14]: (1 – Kirovsk volcano, (2 – Uglovsk-Artemovsk volcanoes, (3) – Lesozavodsk pipe for the explosion, (4) – Vietnam and (5) – South-east China [17, 18], (6) – Korea [14], (7) – the islands of Polynesia [16]. Halos denote fields according to [32]: I – the general field of the lamproite series, I¹ – lamproites of Western Australia, II – common field of the kimberlite series, II¹ – basaltoid kimberlites, II² – mica kimberlites, II³ – calcite kimberlites.]

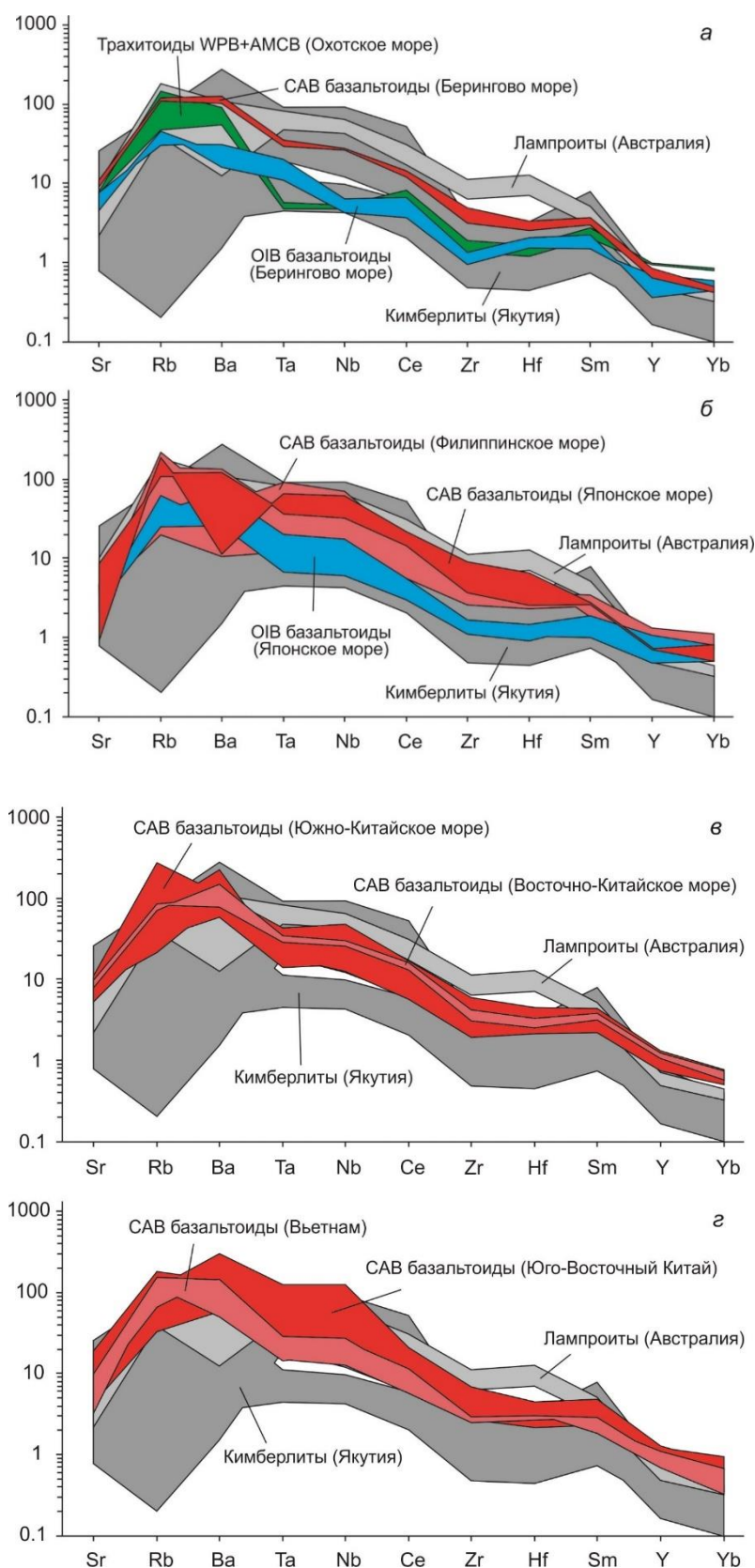


Рис. 3. Многокомпонентные диаграммы редких элементов, нормированных к стандарту N-MORB по [33], для щелочных базальтоидов окраинных морей (а, б, в) и некоторых районов прилегающей суши (г).

[Fig. 3. Multicomponent diagrams of trace elements normalized to the N-MORB standard according to [33] for alkaline basalts of marginal seas (a, b, c) and some areas of adjacent land (d).]

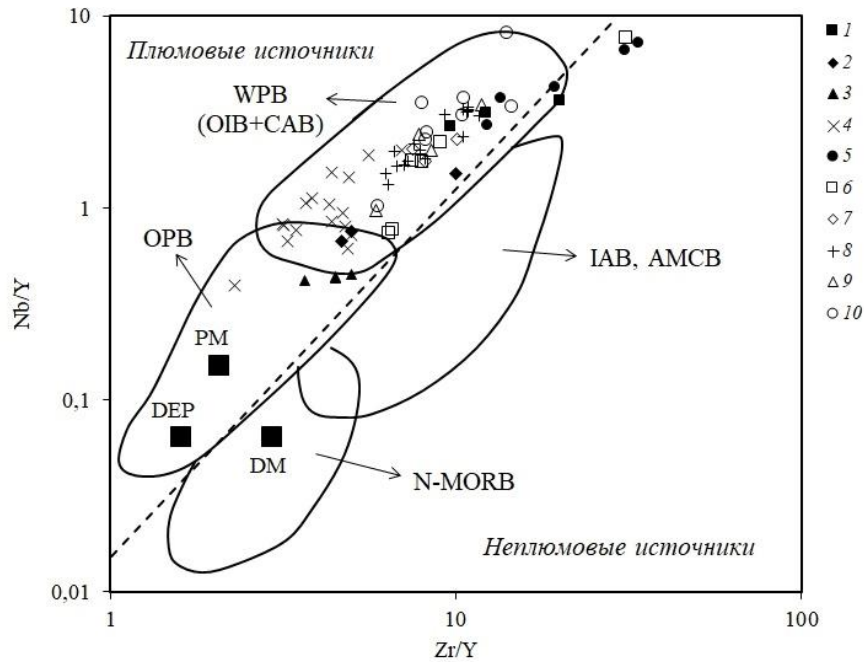


Рис. 4. Дискриминантная диаграмма $(Zr/Y)-(Nb/Y)$ [34] для щелочных базальтоидов. Ореолами обозначены геодинамические обстановки: *IAB, AMCB* – островных дуг и активных континентальных окраин; *OIB* – океанических островов; *OPB* – океанических плато; *N-MORB* – срединно-океанических хребтов. Пунктирная линия разделяет поля плюмовых и неплюмовых мантийных источников. Условные обозначения на рис. 2а. 9, 10 – щелочные базальтоиды (CAB-тип) Вьетнама и Юго-Восточного Китая, соответственно.

[Fig. 4. Discriminant diagram $(Zr/Y)-(Nb/Y)$ [34] for alkaline basalts. Halos indicate geodynamic settings: *IAB, AMCB* - island arcs and active continental margins; *OIB* - oceanic islands; *OPB*, oceanic plateaus; *N-MORB* - mid-ocean ridges. The dotted line separates the fields of plume and non-plume mantle sources. Legends see in 2a. (9, 10) – alkaline basalts (CAB-type) of Vietnam and South-east China, respectively.]

Сравнительный анализ показывает, что по общей щелочности CAB базальтоиды близки лампроитам Западной Австралии, а OIB базальтоиды тяготеют к границам лампроитов и кимберлитов (рис. 2а). По соотношениям K_2O к его сумме с Na_2O и CaO те и другие породы сравнимы со слюдяными кимберлитами (рис. 5а), а по концентрациям Al_2O_3 и CaO – с породами тефрит-лейцитовый серии (рис. 6а). Уровни

кремнеземистости и магнезиальности ($Mg\#$) в базальтоидах CAB-типа демонстрируют их близость к породам тефрит-лейцитовый и камафугитовой серий, а OIB базальтоидов – к лампроитам Западного Кимберли (рис. 7а). Спектр редких элементов в CAB и OIB базальтоидах сопоставим со спектром лампроитов Австралии (рис. 3а).

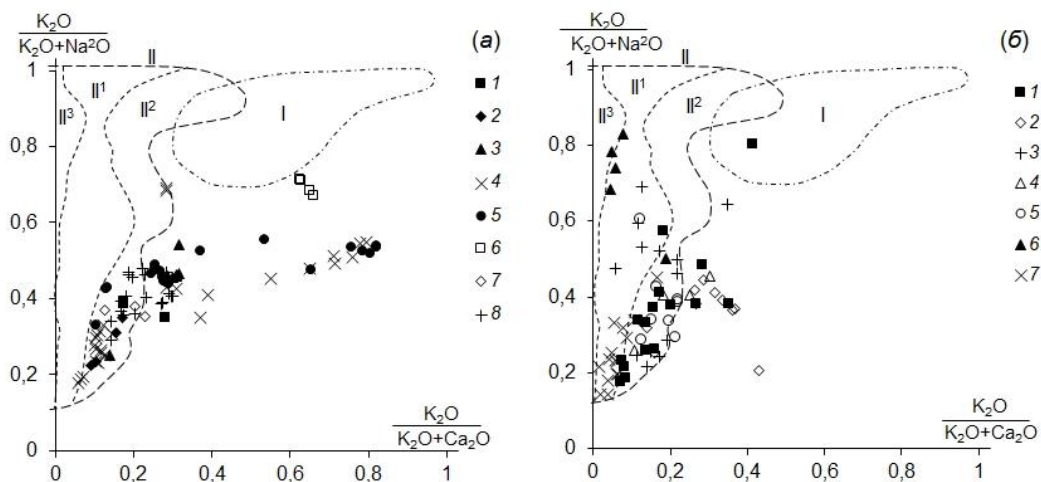


Рис. 5. Диаграмма соотношений K_2O к его сумме с Na_2O и CaO [32] для щелочных базальтоидов: *а* – окраинных морей, *б* – окружающей суши. Условные обозначения на рис. 2.

[Fig. 5. Ratio diagram of K_2O to its sum with Na_2O and CaO [32] for alkaline basalts: (*a*) – marginal seas, (*b*) – the surrounding land. Legends see in Fig. 2.]

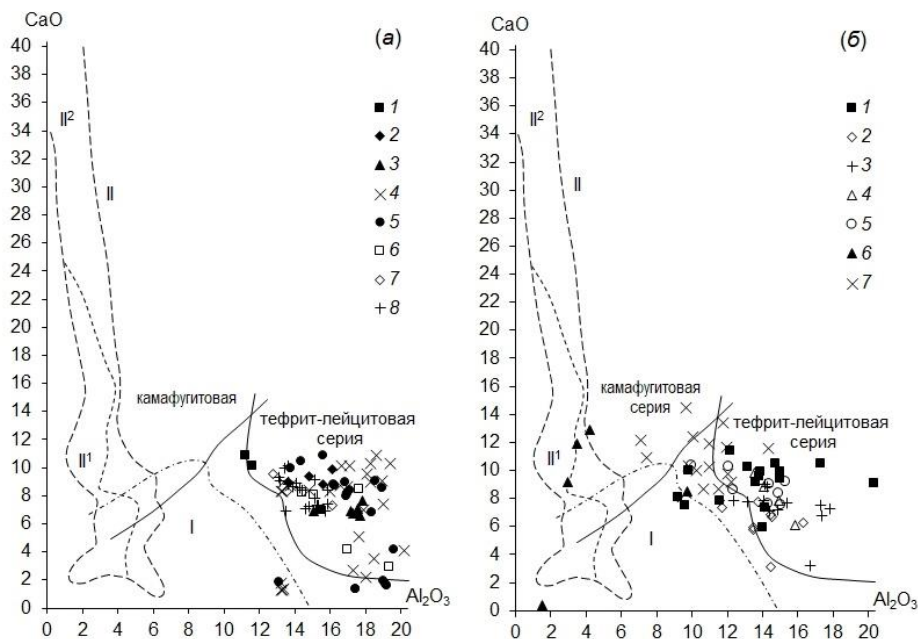


Рис. 6. Диаграмма Al₂O₃-CaO [32] для щелочных базальтоидов: а – окраинных морей, б – окружающей суши. Условные обозначения на рис. 2.

[Fig. 6. Al₂O₃-CaO diagram [32] for alkaline basaltoids: (a) – marginal seas, (b) – the surrounding land. For legends, see Fig. 2.]

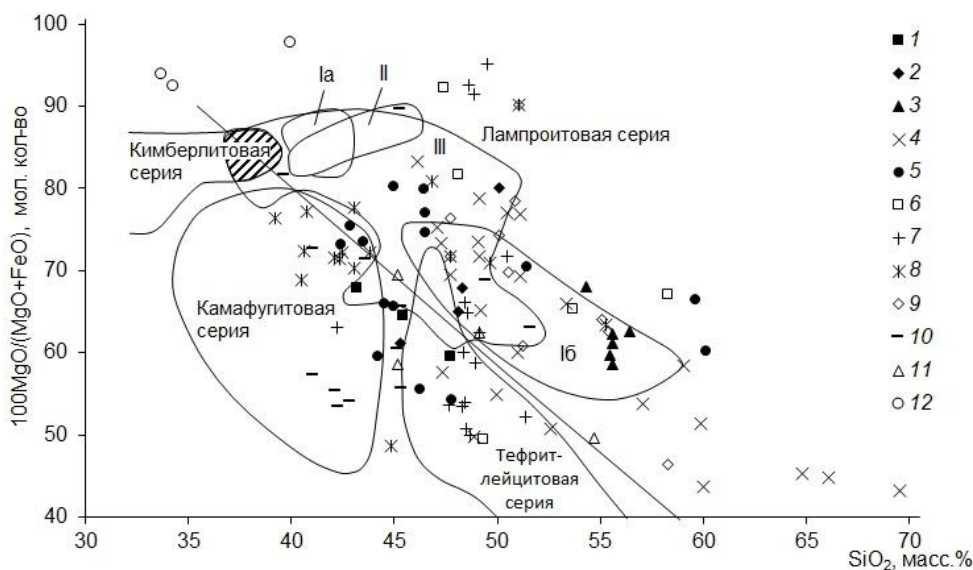


Рис. 7. Соотношение SiO₂ (в мас. %) и Mg# (мол. кол-во) в щелочных базальтоидах. Условные обозначения: 1–7 – на рис. 2а; Приморье: 8 – Кировский вулкан, 9 – Угловско-Артемовские вулканы, 10 – Лесозаводская трубка взрыва; 11 – Вьетнам; 12 – Корея (Пакчхон). Австралийская провинция по [35]: Ia – ультраосновные лампроиты, Ib – основные и средние лампроиты Западного Кимберли; II – ультраосновные лампроиты Восточного Кимберли; III – Алданская провинция: ультраосновные и основные лампроиты.

[Fig. 7. SiO₂ (in wt. %) and Mg# (mol. number) ratio in alkaline basaltoids: (1–7) – in Fig. 2a; Primorye: (8) – Kirovsk volcano, (9) – Uglovsk-Artemovsk volcanoes, (10) – Lesozavodsk pipe for the explosion; (11) – Vietnam; (12) – Korea (Pakchon). Australian province according to [35]: Ia, ultrabasic lamproites; Ib, basic and intermediate lamproites of the West Kimberley; II, ultramafic lamproites of the East Kimberley; III - Aldan province: ultrabasic and basic lamproites.]

Таким образом, по щелочности и большинству редких элементов базальтоиды САВ-типа сравнимы с лампроитами Западной Австралии. По магниальности, известковистости и глиноземистости они близки к тефрит-лейцитовой и частично к камафугитовой сериям. Базальтоиды ОIВ-типа по глиноземи-

стости и известковистости можно отнести к тефрит-лейцитовой серии, по магниальности – к лампроитам Западного Кимберли, а по калиевости – к слюдяным кимберлитам.

В Охотском море на западе Курильской котловины (рис. 1) обнаружены позднеолигоценые и плио-

цен-плейстоценовые трахиандезитобазальты и трахиандезиты [12, 19]. Они характеризуются повышенной щелочностью (рис. 2а) и калиевостью. Повышенные Nb/Yb свидетельствуют об обогащенности трахитоидных пород ниобием и на их близость к WPB образованиям, на это же указывает и расположение точек вблизи границы WPB на диаграмме (Zr/Y)-(Nb/Y) (рис. 4). Учитывая наличие Ta-Nb минимума (рис. 2а), можно предположить, что данные породы сочетают WPB+АСМВ свойства. Многокомпонентная диаграмма иллюстрирует некоторое сходство курильских трахитоидов с лампроитами Австралии (рис. 3а), близость к последним также проявлена и по коэффициенту магнезиальности (рис. 7). По уровню глиноземистости и известковистости породы можно отнести к тефрит-лейцитовой серии (рис. 6а).

В Японском море (рис. 1), как и в Беринговом, установлены 2 типа щелочных базальтоидов – плюмо-океанические (ОИВ-тип) и плюмо-континентальные (САВ-тип) [12 и др.]. Первые представлены оливин-плагиоклазовыми и плагиоклазовыми базальтами, вторые образуют ряд пикробазальты – щелочные трахиты [11 и др.]. В щелочных трахибазальтах и трахитах появляются нефелин и санидин. Уровень щелочности и калиевоности в САВ базальтоидах значительно выше по сравнению с ОИВ базальтоидами. Они также характеризуются более высокими LILE, HFSE и LREE. На диаграмме (Zr/Y)-(Nb/Y) оба типа пород попадают в поле плюмовых источников, в область WPB (ОИВ+САВ), но точки располагаются в отдалении друг от друга, что обусловлено более высокими значениями Zr/Y и Nb/Y в САВ базальтоидах (рис. 4). По суммарной щелочности САВ базальтоиды сравнимы с лампроитами Австралии (рис. 2а), по уровню известковистости и глиноземистости они соответствуют тефрит-лейцитовой серии (рис. 6а), а по коэффициенту магнезиальности – тефрит-лейцитовой и камафугитовой сериям, а также лампроитам Алданской провинции (рис. 7). Базальтоиды ОИВ-типа по высокому уровню известковистости сравнимы со слюдяными кимберлитами (рис. 5а), по глиноземистости – с породами тефрит-лейцитовой серии, (рис. 6а), по магнезиальности – с лампроитами Западного Кимберли (рис. 7). На многокомпонентной диаграмме (рис. 3б) САВ базальтоиды образуют спектр, почти полностью совпадающий со спектром австралийских лампроитов. В отличие от них спектр ОИВ базальтоидов располагается внутри спектра кимберлитов Якутии.

Таким образом, в Японском море наибольшую схожесть петрогеохимических свойств с лампроитами Австралии проявляют щелочные базальтоиды САВ-типа. По уровню глиноземистости, известковистости и магнезиальности они также близки кимберлитоподобным породам тефрит-лейцитовой и камафугитовой серий. Базальтоиды ОИВ-типа по повышенному уровню известковистости и глиноземистости проявляют некоторые черты сходства с породами тефрит-лейцитовой серии, по магнезиальности – с лампроитами Западного Кимберли.

В Филиппинском море позднекайнозойский щелочно-базальтоидный вулканизм САВ-типа проявлен на плато Урданет (рис. 1) и представлен оливиновыми базальтами, трахитами и фонолитами [31 и др.]. На диаграмме щелочи-кремнезем точки пород располагаются в области лампроитовой серии, и по этим параметрам они схожи с САВ базальтоидами Японского моря (рис. 2а). В спектре редких элементов наблюдается положительная Ta-Nb аномалия (рис. 3б). На диаграмме (Zr/Y)-(Nb/Y) их точки располагаются в области WPB (ОИВ+САВ) (рис. 4). На многокомпонентной диаграмме спектр редких элементов частично совпадает со спектром лампроитов Австралии (рис. 3б). По уровню магнезиальности они близки к лампроитам Западного Кимберли и Алданской провинции (рис. 7). По соотношениям K₂O к его сумме с Na₂O и CaO наблюдается схожесть со слюдяными кимберлитами (рис. 5а), а по содержаниям Al₂O₃ и CaO – с породами тефрит-лейцитовой серии (рис. 6а).

В Восточно-Китайском море миоценовые щелочные оливиновые базальты слагают о-ва Тайваньского пролива [18]. В пределах ареала Ксинчан и на о-вах Пэнху они имеют характеристики ОИВ пород, а на о-ве Тайвань сочетают свойства САВ+ОИВ. На дискриминантной диаграмме (Zr/Y)-(Nb/Y) их точки располагаются в области WPB (ОИВ+САВ) (рис. 4). На многокомпонентной диаграмме в спектре редких элементов наблюдается Ta-Nb максимум (рис. 3в), а также совпадение по концентрациям некоторых редких элементов с лампроитами Австралии.

В Южно-Китайском море в глубоководной котловине установлены миоцен-плейстоценовые оливиновые базальты и трахибазальты [18]. Диаграмма Hf-Ta-Th демонстрирует отношение одной части пород к области E-MORB+WPB (ОИВ-тип), а другой – к области WPB (САВ-тип). На юго-западном шельфе плиоцен-голоценовый вулканизм представлен щелочными оливиновыми базальтами, базанитами, реже нефелинитами, трахибазальтами и трахитами [17]. Согласно изотопному составу Pb они являются производными двух источников – мантии Индийского (I-MORB) и Тихого (P-MORB) океанов, т.е. относятся к смешанному САВ+ОИВ-типу. На диаграмме щелочи-кремнезем (рис. 2а) основная часть образцов располагается в поле лампроитовой серии, где они ассоциируют с вулканами САВ-типа Берингово, Японского и Филиппинского морей. На диаграмме (Zr/Y)-(Nb/Y) точки базальтоидов Южно-Китайского моря попадают в область WPB (ОИВ+САВ) (рис. 4). На диаграмме соотношений K₂O к его сумме с Na₂O и CaO (рис. 5а) они занимают область слюдяных кимберлитов; по уровню глиноземистости и известковистости имеют сходство с породами тефрит-лейцитовой серии, а по коэффициенту магнезиальности – с лампроитами Западного Кимберли (рис. 6а, 7). Смешанные черты ОИВ и САВ вулканизма в Южно-Китайском море связаны с влиянием на магмогенезис плюмовых источников: со стороны континента это плюмогенная КСЦТ (рис. 1) [22], со стороны океана – это апофиза Тихоокеанского суперплюма.

На юго-востоке Китая щелочной вулканизм представлен миоцен-плейстоценовыми щелочными оливиновыми базальтами, базанитами, нефелинитами и лимбургитами [18]. Диаграммы Hf-Ta-Th и изотопов Pb иллюстрируют принадлежность большинства пород к областям WPB и I-MORB, что соответствует образованиям САВ-типа. Диаграмма вариаций щелочей и кремнезема показывает отношение пород к лампроитовой серии (рис. 2б), а диаграмма (Zr/Y)-(Nb/Y) – к области плюмовых источников WPB(OIB+САВ) (рис. 4). По соотношениям K₂O к его сумме с Na₂O и CaO они наиболее близки слюдяным кимберлитам (рис. 5б), а по повышенной глиноземистости – к тефрит-лейцитовой серии (рис. 6б). Вышеописанные химические свойства указывают на отношение щелочных базальтоидов Юго-Восточного Китая к САВ-типу.

На северо-западе Вьетнама кайнозойский щелочной вулканизм проявился в виде формирования ультракалийевых кокитов и абсарокитов, на юго-востоке – оливиновых базальтов, базанитов, реже нефелинитов и трахибазальтов [17, 18]. Расположение точек пород в области WPB на диаграммах Hf-Ta-Th и (Zr/Y)-(Nb/Y) (рис. 4) и в области I-MORB на диаграмме изотопов Pb свидетельствует о принадлежности большинства пород к САВ-типу. По уровню общей щелочности и известковистости их можно отнести как к лампроитам, так и к слюдяным кимберлитам (рис. 2б, 5б). Многокомпонентная диаграмма редких элементов (рис. 3з) иллюстрирует спектр, частично совпадающий со спектром лампроитов Австралии. Вариации известковистости и глиноземистости показывают отношение к тефрит-лейцитовой серии (рис. 5б), а коэффициент магнезиальности – к лампроитовой, тефрит-лейцитовой и камафугитовой сериями (рис. 7).

Ранее плюмовая природа большинства вьетнамских и южнокитайских базальтоидов связывалась с наличием плюмового источника Хайнань под шельфом Южно-Китайского моря и береговыми районами Вьетнама [17, 18]. Однако возможно Хайнань составляет единое целое с вновь открытой плюмогенной Катазиатской СЦТ – рис. 1 [22].

На Корейском полуострове установлены позднекайнозойские щелочные базальтоиды в ареалах Намсок и Пхохан-Яннам и в пределах вулканических полей Пэктусан и Чхильбосан [14, 18]. Комплекс грабена Пхохан [18] сложен базальтоидами САВ-типа, а грабена Пектусан – базальтоидами OIB-типа. Ареал Чхильбосан представлен плиоцен-плейстоценовыми оливиновыми базальтами, трахитами, трахириолитами, щелочными игнимбритами [18] смешанной OIB и САВ природы. В провинции Пахчхон обнаружены кимберлитовиды [14], которые на всех выше приведенных диаграммах располагаются в области базальтоидных кимберлитов или на границе базальтоидных и слюдяных кимберлитов (рис. 2б; 5б, 6б, 7).

В Приморском крае кайнозойский щелочно-базальтоидный вулканизм проявлен в пределах Кировского вулкана, группы Угловско-Артемовских

вулканов и Лесозаводской трубки взрыва [14]. Кировский вулкан образован потоками лав и эруптивных брекчий, среди которых выделяются лейцитовые, нефелиновые и санидиновые разновидности. По высокой щелочности и отношению K₂O к его сумме с Na₂O и CaO породы проявляют схожесть с лампроитами Австралии и слюдяными кимберлитами (рис. 2б, 5б), по содержаниям CaO и Al₂O₃ – с тефрит-лейцитовой, а по магнезиальности – с камафугитовой сериями (рис. 7). Угловско-Артемовские вулканы сложены щелочными оливиновыми базальтами, лейцититами, абсарокитами и фергуситами. На диаграмме щелочи-кремнезем большинство образцов располагается в области лампроитов Австралии (рис. 2б). Уровень известковистости и глиноземистости указывает на близость пород к тефрит-лейцитовой серии (рис. 6б), а магнезиальность – на схожесть с лампроитами Западного Кимберли (рис. 7). Лесозаводская трубка взрыва сложена лейцитовыми анкаратритами и анкаратрит-пикритами. На диаграмме щелочи-кремнезем они располагаются в лампроитовой области (рис. 2б). Но по соотношениям K₂O к его сумме с Na₂O и CaO проявляют схожесть с базальтоидными и слюдяными кимберлитами (рис. 5б), а по низкому уровню известковистости и высокому коэффициенту магнезиальности – с породами тефрит-лейцитовой и лампроитовой серий (рис. 6б, 7).

На островах Полинезии (рис. 1) проявлен неоген-четвертичный вулканизм субщелочного и щелочного типа натровой и калиевой специфики [16]. Породы представлены оливиновыми базальтами, гавайитами, нефелинитами, трахитами, муджиеритами и фонолитами, встречаются калиевые (лейцитовые) разности. По уровню общей щелочности и калиевости они сравнимы со слюдяными, реже с базальтоидными кимберлитами (рис. 2б), по уровню глиноземистости и известковистости обладают смешанными свойствами камафугитовой и тефрит-лейцитовой серий. Наличие лейцитовых разновидностей и широкого дифференцированного ряда свидетельствует о длительной эволюции островов (около 120 млн лет) и участии в магмогенерации мантии Индийского океана (I-mantle или Dupel Mantle), простирающейся в южную часть Тихого океана и имеющей отличную от него геохимическую специфику. Поэтому вулканизм островов Полинезии с проявленной натровой и калиевой спецификой имеет смешанный OIB и САВ генезис.

Обсуждение

Исследования петролого-геохимических свойств кайнозойского щелочно-базальтоидного вулканизма окраинных морей и прилегающей суши указывают на различную его природу в разных частях Западно-Тихоокеанской зоны перехода – плюм-континентальную (САВ) и плюм-океаническую (OIB) согласно классификации [30]. В первом случае магмогенерация происходила с участием апофиз Африканского суперплюма, ранее выделяемого как мантия Индийского океана (или Dupel Mantle), во втором Тихоокеанского

суперплюма. Два крупнейших суперплюма установлены геофизическими методами. В рамках современной концепции плюмтектоники их формирование на границе ядро–нижняя мантия (слой D'') и подъем к подошве литосферы поддерживается многими исследователями [20, 36, 37 и др.] и находит подтверждение в особенностях редкометальной и изотопной геохимии вулканических пород.

Корреляция обоих типов вулканизма, проявленных в зоне перехода, с лампроитовым и кимберлитовым вулканизмом Австралии и Якутии показывает следующее. К общим чертам относятся значения Zr/Y и Nb/Y , указывающие на принадлежность щелочно-базальтоидных пород к продуктам внутриплитных плюмовых источников (рис. 4). Породы ОИВ источника характерны для глубоководных котловин окраинных морей, САВ источника – для шельфовых областей морей, подводных возвышенностей и прилегающих участков суши (рис. 1).

Основными особенностями лампроитового вулканизма является высокая калиево- и высокая магнезиальность [35 и др.]. Повышенная щелочность и калиево- и магнезиальность в ОИВ и САВ базальтоидах близка к таковой в лампроитах Западной Австралии и слюдяных кимберлитах (рис. 2а). По коэффициенту $Mg\#$ породы обоих типов имеют сходство с породами лампроитовой, тефрит-лейцитовой и камафугитовой серий (рис. 7). Уровни глиноземистости и известковистости подтверждают отношение ОИВ базальтоидов к тефрит-лейцитовой серии, а САВ базальтоидов – к тефрит-лейцитовой и камафугитовой сериям. Все исследуемые щелочно-базальтоидные породы характеризуются, в той или иной степени, близким к лампроитам микроэлементным составом и содержат типоморфные минералы, по которым они подразделяются на оливиновые, лейцитовые (или нефелиновые) и санидиновые разновидности, которые могут содержать либо сами алмазы, либо их минералы-спутники [6, 10 и др.]. Вышеописанные свойства щелочных базальтоидов внутриплитной ОИВ и САВ природы позволяют рассматривать регионы с проявлениями такого рода вулканизма как объекты потенциальной алмазности в свете новых взглядов на происхождение алмазов нетрадиционного типа.

Несмотря на существовавшие долгое время точки зрения на происхождения алмазов – субдукционную и верхнемантийную [2, 3 и др.], в последние годы все больше исследователей склоняются к тому, что их генезис связан с нижнемантийными плюмами. Подтверждением этому служит наличие включений в алмазах минералов нижней мантии (ферропериклаза, $MgSi$ -перовскита, стишовита) на крупных россыпных месторождениях Якутии, Урала, Юго-Западной Африки, Южной Америки, Австралии, не имеющих связи с кимберлитовыми трубками [4, 38, 39 и др.].

Приемлемыми условиями сохранности алмазов в магматическом очаге являются высокое давление, умеренная температура и низкая степень частичного

плавления (0.5–5 %), что обеспечивается декомпрессионным плавлением закрытого плюмового источника [5]. Важным условием также является наличие углерода. Согласно одной из точек зрения, это могут быть сверхглубинные флюиды водородно-метанового состава, так называемый газовый пузырь, взрыв которого на границе ядро–нижняя мантия приводит к плавлению мантии и формированию суперплюмов [6–8, 40–42, и др.]. Одна часть газового флюида участвует в плавлении, другая, поднимаясь вверх, опережает плюмовый апвеллинг.

Возможно, подъемом сверхглубинных флюидов можно дополнить наиболее популярную в настоящее время модель формирования алмазов, объединяющую экзогенное (органогенное) их происхождение и плюмогенез [43], заменив ими такой источник углерода, как карбонатные толщи субдуцирующей океанской плиты. В данной модели вышеуказанные РТ условия обеспечиваются на глубине 410–660 км, где происходит формирование алмазов (вернее, их ядер). Именно с этого уровня идет захват алмазов восходящими плюмами, которые выносят их к подошве литосферы. В области океанических островов с маломощной океанической литосферой это мелкие алмазы, а в случае мощной континентальной литосферы кратонов в магматических очагах формируются крупные алмазы в результате наращивания на алмазные ядра оболочек из более тяжелого «литосферного» углерода [43].

Важную роль в сохранности алмазных скоплений и тем более в формировании месторождений играют другие немаловажные условия. При длительной кристаллизации щелочной магмы остается опасность их разрушения. Транспортировка магматического расплава к поверхности должна быть быстрой, а среда, в которую попадают алмазы – быстро охлаждающей, как это происходило при формировании крупнейшего месторождения алмазов в Западной Австралии (лампроиты Аргайла). Транспортировка расплавов там осуществлялась в диатремовых структурах, а роль охладителя играла песчаная среда, в которой формировались алмазоносные тuffы. В них алмазов на порядок больше, чем в массивных лампроитах [6], хотя их расплавы и были алмазоносными.

В пределах окраинных морей и других участков зоны перехода с проявленным ОИВ и САВ вулканизмом затягиванию алмазосодержащих расплавов в циклонические и антициклонические структуры и быстрому выносу их на поверхность способствовала вихревая геодинамика. А мгновенное охлаждение в морской среде обеспечивало быструю кристаллизацию магмы и сохранность алмазов. В случае ОИВ вулканизма, широко проявленного в котловинах Японского моря, и незначительно – в котловинах Берингова и Южно-Китайского морей, это могут быть мелкие кристаллы, аналогичные обнаруженным на океанических островах [43]. В местах с широко проявленным САВ вулканизмом на шельфах и подводных возвышенностях, а также на материковом обрамлении с

докембрийским основанием и наличием плюмогенных СЦТ мощная литосфера платформ играла позитивную роль в росте алмазных кристаллов, как это показано в модели [43]. Таким образом, еще одно важное условие соблюдается в зоне перехода – длительная докайнозойская истории развития территорий, на которых в кайнозойе формировались котловины окраинных морей. Дело в том, что и перидотиты ксенолитов из лампроитов трубки Аргайл (Австралия) имеют архейский возраст (более 2.5 млрд лет), а условия стабильности алмазов оцениваются в 1400 млн лет [35]. Формирование лампроитов Алданской провинции (Якутия) также охватывает значительный период времени от раннего протерозоя (1818–1970 млн лет) до позднего мезозоя (120 млн лет). Учитывая докембрийский возраст фундамента зоны перехода (особенно, архейско-протерозойский возраст Китайской платформы), можно говорить о том, что щелочно-базальтоидные расплавы мощных кайнозойских этапов ОИВ и САВ вулканизма, сопровождавшего рифтогенные и спрединговые процессы, могли быть алмазодульными, что позволяет считать окраинные моря (и участки окружающей их суши) потенциально алмазодульными.

Заключение

В Западно-Тихоокеанской зоне перехода континент–океан широко проявлен кайнозойский плюмоокеанический и плюмоконтинентальный вулканизм (ОИВ и САВ-типов). Первый характерен для глубоководных котловин, второй – для островов и шельфовых зон окраинных морей и окружающей суши. Петролого-геохимические свойства щелочных базальтоидов обоих типов показали их причастность к тефрит-лейцитовой, камафугитовой и лампроитовой сериям и близость к составу алмазодульных лампроитов и кимберлитов Западной Австралии и Якутии.

Щелочно-базальтоидные расплавы, с большой долей вероятности, могли быть алмазодульными. Для этого в зоне перехода выполняются главные условия: глубинность зарождения алмазов (их ядер) в зоне устойчивости в интервале глубин 410–660 км, наличие углерода (из карбонатных толщ субдуцирующей плиты или сверхглубинные водородно-метановые флюиды) и вынос нижнемантийными плюмами. В области маломощной океанической литосферы выносятся мелкие кристаллы, под мощной (кратоновой) литосферой формируются крупные кристаллы с «наросшими» оболочками из тяжелого углерода. Сохранность алмазов обеспечивается низкой степенью адиабатического плавления плюмового источника, высоким давлением и умеренной температурой, быстрая транспортировка – вихревым механизмом, а мгновенное охлаждение – попаданием в морскую среду. Роль охладителя в пределах окружающей суши играют терригенные и другие осадочные отложения, а при взрывном вулканизме они могут участвовать в формировании алмазодульных туфов и туфобрекчий.

Таким образом, все выше сказанное может указывать на очевидную индикаторную роль кайнозойского щелочно-базальтоидного плюмового ОИВ и САВ вулканизма и вихревой геодинамики в актуальном вопросе прогнозирования алмазов нетрадиционного типа в окраинных морях и других структурах зоны перехода континент–океан.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каминский Ф. В., Саблуков С. М. Нетрадиционные месторождения алмазов // *Наука в России*. 2002. № 1. С. 4–12.
2. Афанасьев В. П., Лобанов С. С., Похиленко Н. П., Коптиль В. И., Митюхин С. И., Герасимчук А. В., Помазанский Б. С., Горев Н. И. Полигенез алмазов Сибирской платформы // *Геология и геофизика*. 2011. Т. 52. № 3. С. 335–353.
3. Сорохтин О. Г., Мирофанов Ф. П., Сорохтин Н. О. Глобальное эволюция Земли и происхождение алмазов. М.: Наука, 2004. 245 с.
4. Шкодзинский В. С., Зайцев А. И. Генезис алмаза в кимберлитах и лампроитах // *Литосфера*. 2006. № 1. С. 102–112.
5. Богатиков О. А., Коваленко В. И., Шарков Е. В. Магматизм, тектоника, геодинамика Земли: Связь во времени и в пространстве. М.: Наука, 2010. 606 с.
6. Владыкин Н. В. Петрология калиево-щелочных лампроит-карбонатитовых комплексов, их генезис и рудоносность // *Геология и геофизика*. 2009. Т. 50. № 12. С. 1443–1455.
7. Добрецов Н. Л. Глобальная геодинамическая эволюция Земли и глобальные геодинамические модели Земли // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 6. С. 761–784.
8. Жатнуев Н. С. Трансмантийные (интертеллурические) флюиды: новая модель плюмов и плюмового магматизма // *Геология и геофизика*. 2016. Т. 57. № 8. С. 1445–1454. DOI: 10.15372/GiG20160802.
9. Трубицын В. П., Харьбин Е. В. Термохимические мантийные плюмы // *ДАН*. 2010. Т. 435. № 5. С. 683–685.
10. Mitchell R. H., Bergman S. C. Petrology of Lamproites. New York and London: Plenum Press, 1991. 424 p.
11. Берсенев И. И., Леликов Е. П., Безверхний В. Л., Ващенко Н. Г., Съедин В. Т., Терехов Е. П., Цой И. Б. Геология дна Японского моря. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1987. 140 с.
12. Емельянова Т. А., Петрищевский А. М., Изосов Л. А., Ли Н. С., Пугачев А. А. Позднемезозойско-кайнозойские этапы вулканизма и геодинамика Японского и Охотского морей // *Петрология*. 2020. Т. 28. № 5. С. 468–481. DOI: 10.31857/S0869590320050027.
13. Geology and geophysics of the Japan Sea / Eds. N. Isezaki, I. I. Bersenev, K. Tamaki. Tokyo: Terra. Publ. Company (TERRAPUB), 1996. 487 p.
14. Изосов Л. А., Коновалов Ю. И., Емельянова Т. А. Проблемы геологии и алмазодульности зоны перехода континент – океан (Япономорский и Желтоморский регионы). Владивосток: Дальнаука, 2000. 326 с.
15. Изосов Л. А., Емельянова Т. А., Ли Н. С., Мельниченко Ю. И. Вопросы глобальной тектоники // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2022. № 4. С. 4–19. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/4/4-19>.
16. Голубева Э. Д. Эволюция магматизма Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2009. 132 с.

17. Колосков А. В., Федоров П. И., Рашидов В. А. Новые данные о составе продуктов четвертичного вулканизма шельфовой зоны северо-западного обрамления Южно-Китайского моря и проблема астеносферного диапиризма // *Тихоокеанская геология*. 2016. Т. 35. № 2. С. 3–28.
18. Федоров П. И. Кайнозойский вулканизм в зонах растяжения на восточной окраине Азии. Труды ГИН РАН. Вып. 537. М.: ГЕОС, 2006. 316 с.
19. Werner R., Baranov B., Hoernle K., Bogaard van den P., Nau F., Tamarin I. Discovery of Ancient Volcanoes in the Okhotsk Sea (Russia): New Constraints on the Opening History of the Kurile Back Arc Basin // *Geosciences*. 2020. Vol. 10. P. 442.
20. Кузьмин М. И., Ярмолюк В. В., Кравчинский В. А. Абсолютные палеогеографические реконструкции Сибирского континента в фанерозое: к проблеме оценки времени существования суперплюмов // *ДАН*. 2011. Т. 437. № 1. С. 68–73.
21. Хомич В. Г., Борискина Н. Г. Северо-Азиатский суперплюм и платиноносность юго-востока России // *ДАН*. 2011. Т. 436. № 3. С. 356–359.
22. Петрищевский А. М., Емельянова Т. А., Изосов Л. А. О возрастных взаимоотношениях рифтогенеза, субдукции, плюмовых процессов на северо-восточной окраине Азии // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2021. № 4. Вып. 52. С. 22–45. DOI: 10.31431/1816-5524-2021-4-52-22-45.
23. Вихри в геологических процессах. Под ред. А. В. Викулина. Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2004. 297 с.
24. Изосов Л. А., Чупрынин В. И. О механизме формирования геологических структур центрального типа Западно-Тихоокеанской зоны перехода континент – океан // *Геотектоника*. 2012. № 3. С. 70–91.
25. Изосов Л. А., Чупрынин В. И., Петрищевский А. М., Емельянова Т. А., Мельниченко Ю. И., Васильева М. А., Ли Н. С. Формирование окраинных Тихого океана: следствие сдвиговой неустойчивости и астеносферного диапиризма // *Вестник КРАУНЦ. Науки о земле*. 2020. № 2. Вып. 46. С. 85–101. DOI: 10.31431/1816-5524-2020-2-46-85-101.
26. Тверитинова Т. Ю., Викулин А. В. Геологические и геофизические признаки вихревых структур в геологической среде // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2005. № 5. С. 59–76.
27. Takeuchi A. Pacific swing: Cenozoic episodicity of tectonism and volcanism in Northeastern Japan // *Memoir of the Geol. Soc. of China*. 1986. No 7. P. 233–248.
28. Мишкин М. А., Вовна Г. М. Докембрийская сиалическая кора и ее происхождение // *Бюллетень МОИП. Отдел геологический*. 2009. Т. 84. № 5. С. 3–10.
29. Емельянова Т. А., Костицын Ю. А., Леликов Е. П. Геохимия вулканитов подводного хребта Витязя на Тихоокеанском склоне Курильской островной дуги // *Геохимия*. 2012. № 3. С. 316–332.
30. Лазаренков В. Г. Щелочные плюмы континентов и океанов // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 9. С. 1240–1248.
31. Леликов Е. П., Емельянова Т. А. Щелочно-базальтоидный вулканизм японского и филиппинского морей: геохимические и генетические черты сходства и различия // *ДАН*. 2016. Т. 468. № 1. С. 57–61.
32. Хан И. С., Панкратьев П. В. Об алмазоносности южной части Уральского покровно-складчатого пояса (на примере Оренбургской области) // *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2015. № 6 (181). С. 229–235.
33. Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle compositions and processes // *Magmatism in the Ocean Basins*. Oxford: Blackwell, 1989. P. 313–345.
34. Condie K. C. Incompatible element ratios in oceanic basalts and komatiites: Tracking deep mantle sources and continental growth rates with time // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2003. Vol. 4. № 1. P. 1–18. DOI: 10.1029/2002GC000333.
35. Кононова В. А., Богатиков О. А., Кондрашов И. А. Кимберлиты и лампроиты: критерии сходства и различий // *Петрология*. 2011. Т. 19. № 1. С. 35–55.
36. Коваленко В. И., Ярмолюк В. В., Богатиков О. А. Закономерности пространственного распределения «горячих точек» в мантии современной Земли // *ДАН*. 2009. Т. 427. № 5. С. 654–658.
37. Superplums: Beyond Plate Tectonics / in: D. A. Yuen, S. Maruyama, S. Karato, B. E. Windley. New York: Springer, 2007. 509 p.
38. Каминский Ф. В. Минералогия и геохимия нижней мантии. М.: ГЕОХИ РАН, 2011. 68 с.
39. Шкодзинский В. С. Величина удельной интенсивности рентгенолюминесценции алмазов как показатель последовательности их кристаллизации в мантии // *Отечественная геология*. 2014. № 5. С. 69–73.
40. Артюшков Е. В., Кориковский С. П., Массон Х.-Й, Чехович П. А. Новейшие поднятия коры на докембрийских кратонах. Основные закономерности и возможные механизмы // *Геология и геофизика*. 2018. Т. 59. № 11. С. 1737–1764. DOI: 10.15372/GIG20181101.
41. Летников Ф. А. Сверхглубинные флюидные системы и проблемы рудогенеза // *Геология рудных месторождений*. 2001. Т. 43. № 4. С. 291–307.
42. Старостенко В. И., Лукин А. Е., Цветкова Т. А., Заец Л. Н., Донцов В. В., Савиных Ю. В. Об участии суперглубинных флюидов в нефтидогенезе (по данным изучения уникального нефтяного месторождения Белый Тигр) // *Геофизический журнал*. 2011. Т. 33. № 4. С. 3–32.
43. Doucet L.-S., Li Z.-X., Gamaleldien H. Oceanic and super-deep continental diamonds share a transition zone origin and mantle plume transportation // *Scientific Reports*. 2021. № 11. Art. № 16958. DOI: 10.1038/s41598-021-96286-8.

The indicator role of alkaline-basaltoid volcanism and vortex geodynamics in the origin of unconventional diamonds in the West Pacific zone of the continent–ocean transition

©2023 T. A. Emelyanova✉, N. S. Lee, Yu. I. Melnichenko

V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far-Eastern Division of the Russian Academy of Sciences, 43 Baltiiskaya ul., Vladivostok, 690041, Russian Federation

Dedicated to the memory of L. A. Izosova

Abstract

Introduction: For the first time, the question of the prospects for diamonds of unconventional genesis in the West Pacific transition zone has been raised. In the Cenozoic, the tectonomagmatic activation of the transition zone was carried out under the influence of lower mantle plumes - the apophyses of the African and Pacific superplumes, adiabatic melting, which led to WPB volcanic outbursts of the CAB and OIB types, respectively. Plume upwelling contributed to the removal of diamonds from their stability zone. The carbonate strata of the subducting plate or superdeep hydrogen–methane gases rising from the core–lower mantle boundary served as the source of carbon.

Materials and Methods: Research methods included the identification of faults and structures of the central type. The radioisotope age, petrological and geochemical composition, and radiogenic isotopes of Pb, Nd, and Sr were determined at analytical centres in Russia, Germany, and the United States.

Results and Discussion: The petrological and geochemical properties of alkaline basaltoids indicate that the CAB and OIB types of volcanism belong mainly to the tephrite–leucite, kamafugitic, and lamproite series, which can serve as one of the criteria for the potential diamond content of this zone. Other criteria include: 1) the presence of an ancient basement and a weakened tectonic framework of the transition zone; 2) vortex geodynamics, which contributed to the pulling of diamond-bearing mantle melts into cyclonic and anticyclonic eddies.

Conclusion: Marginal seas and areas of the surrounding land can be attributed to objects that are promising for the discovery of small diamonds in places of manifestation of OIB volcanism, and larger accumulations of large crystals in the areas of activation of ancient platforms and manifestations of CAB volcanism.

Keywords: marginal seas, plume tectonics, kimberlites, lamproites.

Funding: The work was carried out within the framework of the state task of the POI FEB RAS (Reg. no. 121021700342-9, no. 121021500055-0, no. AAA-A19-119122090009-2).

For citation: Emelyanova T. A., Lee N. S., Melnichenko Yu. I. The indicator role of alkaline-basaltoid volcanism and vortex geodynamics in the origin of unconventional diamonds in the West Pacific zone of the continent–ocean transition // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya –Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 2, pp. 4–18. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/2/4-18>



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Tatyana A. Emelyanova, e-mail: emelyanova@poi.dvo.ru

Conflict of interests: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Kaminskii F.V., Sablukov S.M. Netraditsionnye mestorozhdeniya almazov [Nontraditional diamond deposits]. *Nauka v Rossii – Science in Russia*, 2002, no. 1. pp. 4–12 (In Russ.)
2. Afanas'ev V.P., Lobanov S.S., Pokhilenko N.P., Koptil' V.I., Mityukhin S.I., Gerasimchuk A.V., Pomazanskii B.S., Gorev N.I. Poligenez almazov Sibirskoi platformy [Polygenesis of diamonds in the Siberian Platform]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 2011, vol. 52, no. 3, pp. 335–353 (In Russ.)
3. Sorokhtin O.G., Mirofanov F.P., Sorokhtin N.O. *Global'noe evolyutsiya Zemli i proiskhozhdenie almazov* [Global evolution of the Earth and the origin of diamonds]. Moscow, Nauka, 2004, 245 p. (In Russ.)
4. Shkodzinskii V.S., Zaitsev A.I. Genesis almaza v kimberlitakh i lamproitakh [Genesis of diamond in kimberlites and lamproites]. *Litosfera – Lithosphere*, 2006, no. 1, pp. 102–112 (In Russ.)
5. Bogatkov O.A., Kovalenko V.I., Sharkov E.V. *Magmatizm, tektonika, geodinamika Zemli: Svyaz' vo vremeni i v prostranstve* [Magmatism, Tectonics, Geodynamics of the Earth: Connection in Time and in Space]. Moscow, Nauka, 2010, 606 p. (In Russ.)
6. Vladykin N.V. Petrologiya kaklievo-shchelochnykh lamproit-karbonatitovykh kompleksov, ikh genezis i rudonosnost' [Potassium alkaline lamproite-carbonatite complexes: petrology, genesis, and ore reserves]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 12. pp. 1443–1455 (In Russ.)
7. Dobretsov N.L. Global'naya geodinamicheskaya evolyutsiya Zemli i global'nye geodinamicheskie modeli Zemli [Global dynamic evolution of the Earth and global geodynamic models]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, no. 6, pp. 761–784 (In Russ.)
8. Zhatnuev N.S. Transmantiinye (intertelluricheskie) flyuidy: novaya model' plyumov i plyumovogo magmatizma [Transmantle (intratelluric) fluid flows: a new model for plumes and plume magmatism]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 2016, vol. 57, no. 8. pp. 1445–1454 (In Russ.). DOI: 10.15372/GiG20160802
9. Trubitsyn V.P., Kharybin E.V. Termokhimicheskie mantiinye plyумы [Thermochemical mantle plumes]. *Doklady akademii nauk – Doklady Earth Sciences*, 2010, vol. 435, no. 5, pp. 683–685 (In Russ.)
10. Mitchell R.H., Bergman S.C. *Petrology of Lamproites*. New York and London, Plenum Press, 1991, 424 p.
11. Bersenev I.I., Lelikov E.P., Bezverkhniy V.L., Vashchenkova N.G., S"edin V.T., Terekhov E.P., Tsoi I.B. *Geologiya dna Yaponskogo morya* [Geology of Japan Sea]. Vladivostok, DVNTs AN SSSR, 1987, 139 p. (In Russ.)
12. Emel'yanova T.A., Petrishchevskii A.M., Izosov L.A., Li N.S., Pugachev A.A. Pozdnemezozoisko-kainozoiskie etapy vulkanizma i geodinamika Yaponskogo i Okhotskogo morei [Late Mesozoic–Cenozoic Stages of Volcanism and Geodynamics of the Sea of Japan and Sea of Okhotsk]. *Petrologiya – Petrology*, 2020, vol. 28, no. 5, pp. 468–481 (In Russ.). DOI 10.31857/S0869590320050027
13. *Geology and geophysics of the Japan Sea* / In Isezaki N., Bersenev I.I., Tamaki K. (eds.). Tokio, Terra Scient. Publ. Company (TERRAPUB), 1996, 487 p.
14. Izosov L.A., Kononov Yu.I. *Zapadno-Cikhoteh-Alinskii okrainno-kontinental'nyi vulkanicheskii poyas i ego tektonicheskaya pozitsiya v Zapadno-Tikhookeanskoj zone perekhoda kontinent – okean* [West Sikhote-Alin marginal continental volcanic belt and its tectonic position in the West Pacific continent-ocean transition zone]. Vladivostok, Dalnauka, 2005, 315 p. (In Russ.)
15. Izosov L.A., Emel'yanova T.A., Li N.S., Mel'nichenko Yu.I. Voprosy global'noi tektoniki [Issues of global tectonics]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 4, pp. 4–19 (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/4/4-19>
16. Golubeva E.D. *Evolutsiya magmatizma Tikhogo okeana* [Evolution of the magmatism of the Pacific Ocean]. Vladivostok, Dalnauka, 2009, 132 p. (In Russ.)
17. Koloskov A.V., Fedorov P.I., Rashidov V.A. Novye dannye o sostave produktov chetvertichnogo vulkanizma shel'fovoi zony severo-zapadnogo obramleniya Yuzhno-Kitaiskogo morya i problema astenosfernogo diapirizma [New data on the composition of products of quaternary volcanism at the northwestern margin of the South China Sea shelf zone and the problem of asthenospheric diapirism]. *Tikhookeanskaya geologiya – Russian Journal of Pacific Geology*, 2016, vol. 35, no. 2, pp. 3–28 (In Russ.)
18. Fedorov P.I. *Kainozoiskii vulkanizm v zonakh rastyazheniya na vostochnoi okraine Azii* [Cenozoic volcanism in stretch zones on the eastern margin of Asia]. Moscow, GEOS, 2006, 316 p. (Tr. GIN RAN; no. 537) (In Russ.)
19. Werner R., Baranov B., Hoernle K., Bogaard van den P., Hau F., Tararin I. Discovery of Ancient Volcanoes in the Okhotsk Sea (Russia): New Constraints on the Opening History of the Kurile Back Arc Basin. *Geosciences*, 2020, vol. 10, pp. 442.
20. Kuz'min M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinskii V.A. Absolyutnye paleogeograficheskie rekonstruktsii Sibirskogo kontinenta v fanerozoje: k probleme otsenki vremeni sushchestvovaniya superplyumov [Absolute paleogeographic reconstructions of the Siberian Craton in the Phanerozoic: A problem of time estimation of superplumes]. *Doklady akademii nauk – Doklady Earth Sciences*, 2011, vol. 437, no. 1, pp. 68–73 (In Russ.)
21. Khomich V.G., Boriskina N.G. Severo-Aziatskii superplyum i platinonosnost' yugo-vostoka Rossii [The North Asian Superplume and platinum mineralization of the Southeast Region of Russia]. *Doklady akademii nauk – Doklady Earth Sciences*, 2011, vol. 436, no. 3, pp. 356–359 (In Russ.)
22. Petrishchevskii A.M., Emel'yanova T.A., Izosov L.A. O vozrastnykh vzaimootnosheniyakh riftogeneza, subduktzii, plyumovykh protsessov na severo-vostochnoi okraine Azii [Age relationships of rifting, subduction and plume processes on the Eastern margin of Asia]. *Vestnik Kraunts. Nauki o zemle – Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*, 2021, no. 4 (52), pp. 22–45 (In Russ.)
23. *Vikhri v geologicheskikh protsessakh* [Vortex-related events of the geological processes]. In Vikulin A.V. (eds.). Petropavlovsk-Kamchatsky, Kamchatskij gosudarstvennyj pedagogicheskij universitet publ., 2004, 297 p. (In Russ.)
24. Izosov L.A., Chuprynin V.I. O mekhanizme formirovaniya geologicheskikh struktur tsentral'nogo tipa Zapadno-Tikhookeanskoj zony perekhoda kontinent – okean [Formation mechanism of central-type structures in the West Pacific continent-ocean transition zone]. *Geotektonika – Geotectonics*, 2012, no. 3, pp. 70–91 (In Russ.)
25. Izosov L.A., Chuprynin V.I., Petrishchevskii A.M., Emel'yanova T.A., Mel'nichenko Yu.I., Vasil'eva M.A., Li N.S. Formirovanie okrainnykh Tikhogo okeana: sledstvie sdvigoj neustoichivosti i astenosfernogo diapirizma [Formation of marginal seas of the Pacific Ocean: a consequence of shear instabil-

- ity and asthenospheric diapirism]. *Vestnik Kraunts. Nauki o zemle – Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*, 2020, no. 2(46), pp. 85–101 (In Russ.)
26. Tveritinova T.Yu., Vikulin A.V. Geologicheskie i geofizicheskie priznaki vikhrevykh struktur v geologicheskoi srede [Geological and geophysical signs of vortex structures in geological medium]. *Vestnik Kraunts. Nauki o zemle – Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle*, 2005, no. 5, pp. 59–76 (In Russ.)
27. Takeuchi A. Pacific swing: Cenozoic episodicity of tectonism and volcanism in Northeastern Japan. *Memoir of the Geol. Soc. of China*, 1986, no. 7, pp. 233–248.
28. Mishkin M.A., Vovna G.M. Dokembriiskaya sialicheskaya kora i ee proiskhozhdenie [Precambrian sialic crust and its origin]. *Byulleten' MOIP. Otdel geologicheskij – Bulletin MOIP. Geological department*, 2009, vol. 84, no. 5, pp. 3–10 (In Russ.)
29. Emel'yanova T.A., Kostitsyn Yu.A., Lelikov E.P. Geokhimiya vulkanitov podvodnogo khrebta Vityazy na Tikhookeanskom sklone Kuril'skoi ostrovnnoi dugi [Geochemistry of the submarine Vityaz Ridge at the pacific slope of the Kurile island arc]. *Geokhimiya – Geochemistry International*, 2012, no. 3, pp. 316–332 (In Russ.)
30. Lazarenkov V.G. Shchelochnye plyumy kontinentov i okeanov [Alkaline plumes of continents and oceans]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, no. 9, pp. 1240–1248 (In Russ.)
31. Lelikov E.P., Emel'yanova T.A. Shchelochno-bazaltoidnyi vulkanizm yaponskogo i filippinskogo morei: geokhimicheskie i geneticheskie cherty skhodstva i razlichiya [Alkaline Basaltic Volcanism of the Sea of Japan and the Philippine Sea: Similar and Distinct Geochemical and Genetic Features]. *Doklady akademii nauk – Doklady Earth Sciences*, 2016, vol. 468, no. 1, pp. 57–61 (In Russ.)
32. Khan I.S., Pankrat'ev P.V. Ob almazonosnosti yuzhnoi chasti Ural'skogo pokrovno-skladchatogo poyasa (na primere Orenburgskoi oblasti) [About diamond potential of the Western slope of the southern Urals and the south-east of the Russian platform (on the example of Orenburg region)]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of the Orenburg State University*, 2015, no. 6 (181), pp. 229–235 (In Russ.)
33. Sun S.-S., McDonough W.F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle compositions and processes. *Magmatism in the Ocean Basins*. Oxford, Blackwell, 1989, pp. 313–345.
34. Condie K.C. Incompatible element ratios in oceanic basalts and komatiites: Tracking deep mantle sources and continental growth rates with time. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, vol. 4, no. 1, pp. 1–18. DOI: 10.1029/2002GC000333.
35. Kononova V.A., Bogatikov O.A., Kondrashov I.A. Kimberlity i lamproity: kriterii skhodstva i razlichii [Kimberlites and lamproites: Criteria for similarity and differences]. *Petrologiya – Petrology*, 2011, vol. 19, no. 1, pp. 35–55 (In Russ.)
36. Kovalenko V.I., Yarmolyuk V.V., Bogatikov O.A. Zakonomernosti prostranstvennogo raspredeleniya «goryachikh tochek» v mantii sovremennoi Zemli [Regularities of spatial distribution of mantle hot spots of the modern Earth]. *Doklady akademii nauk – Doklady Earth Sciences*, 2009, vol. 427, no. 5, pp. 654–658 (In Russ.)
37. *Superplums: Beyond Plate Tectonics*. In: Yuen D.A., Maruyama S., Karato S., Windley B.E. (eds.). New York, Springer, 2007, 509 p.
38. Kaminskii F.V. *Mineralogiya i geokhimiya nizhnei mantii* [Mineralogy and geochemistry of the lower mantle]. Moscow, GEOI RAN, 2011, 68 p. (In Russ.)
39. Shkodzinskii V.S. Velichina udel'noi intensivnosti rentgenoluminestsentsiialmazov kak pokazatel' posledovatel'nosti ikh kristallizatsii v mantii [Value of diamond specific roentgenoluminescence intensity as indicator of theirs crystallization order in the mantle]. *Otechestvennaya geologiya*, 2014, no. 5, pp. 69–73 (In Russ.)
40. Artyushkov E.V., Korikovskii S.P., Masson Kh.-I., Chekhovich P.A. Noveishie podnyatiya kory na dokembriiskikh kratonakh. Osnovnye zakonomernosti i vozmozhnye mekhanizmy [Recent crustal uplift of Precambrian cratons: key patterns and possible mechanisms]. *Geologiya i geofizika – Russian Geology and Geophysics*, 2018, vol. 59, no. 11, pp. 1737–1764 (In Russ.). DOI: 10.15372/GiG20181101
41. Letnikov F.A. Sverkhglubinnye flyuidnye sistemy i problemy rudogeneza [Superdeep fluid systems in the Earth and problems of metallization]. *Geologiya Rudnykh Mestorozhdenii – Geology of Ore Deposits*, 2001, vol. 43, no. 4, pp. 291–307 (In Russ.)
42. Starostenko V.I., Lukin A.E., Tsvetkova T.A., Zaets L.N., Dontsov V.V., Savinykh Yu.V. Ob uchastii superglubinnnykh flyuidov v naftidogeneze (po dannym izucheniya unikal'nogo neftyanogo mestorozhdeniya Belyi Tigr) [On the participation of super-deep fluids in naphthogenesis (according to the study of the unique oil deposit of the White Tiger)]. *Geofizicheskii Zhurnal – Geofizicheskii Zhurnal*, 2011, vol. 33, no. 4, pp. 3–32 (In Russ.)
43. Doucet L.-S., Li Z.-X., Gamaleldien H. Oceanic and super-deep continental diamonds share a transition zone origin and mantle plume transportation. *Scientific Reports*, 2021, no. 11, art. no. 16958. DOI: 10.1038/s41598-021-96286-8

Емельянова Татьяна Андреевна, к.г.-м.н., в. н. с., Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Российская Федерация; e-mail: emelyanova@poi.dvo.ru; ORCID 0000-0002-4790-7270

Ли Наталья Сергеевна, н. с., Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Российская Федерация; e-mail: lee@poi.dvo.ru; ORCID 0000-0001-6658-6946

Мельниченко Юрий Иванович, к.г.-м.н.; с. н. с., Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Российская Федерация; e-mail: yumel@poi.dvo.ru; ORCID 0000-0002-8870-9350

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Tatyana A. Emelyanova, PhD in Geol.-Min., Leading Researcher, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russian Federation; e-mail: emelyanova@poi.dvo.ru; ORCID 0000-0002-4790-7270

Natalya S. Lee, Researcher, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russian Federation; e-mail: lee@poi.dvo.ru; ORCID 0000-0001-6658-6946

Yuri I. Melnichenko, PhD in Geol.-Min., Senior Researcher, V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russian Federation; e-mail: yumel@poi.dvo.ru; ORCID 0000-0002-8870-9350

Authors have read and approved the final manuscript.