

УДК 552.11;550.42;552.333

## ИСТОЧНИКИ РАСПЛАВОВ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ГАЮИНОВЫХ ЩЕЛОЧНЫХ БАЗАЛЬТОИДОВ МАЛОГО КАВКАЗА. СООБЩЕНИЕ 2. ПРИРОДА ОБОГАЩЕННОГО МАНТИЙНОГО ИСТОЧНИКА

© 2024 г. С. Н. Бубнов\*, Ю. В. Гольцман, И. А. Кондрашов,  
Т. И. Олейникова, А. Я. Докучаев

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия*

*\*e-mail: bubnov@igem.ru*

Поступила в редакцию 11.04.2024 г.

После доработки 05.07.2024 г.

Принята к публикации 21.08.2024 г.

На основе геохимического и изотопно-геохимического (Sr–Nd–Pb) изучения четвертичных внутриплитных гаюиновых базанитов и орданшитов Малого Кавказа обозначена наиболее вероятная природа (особенности вещественного состава и уровни локализации) обогащенного мантийного источника ЕМ II типа, который совместно с умеренно деплетированный региональный плюм-астеносферный источником ОIВ-типа “Caucasus” участвовал в генерации расплавов изученных пород. Показано, что источник этого типа модифицирован субдукционной компонентой, обозначены время и возможные механизмы “заражения” областей мантийной магмогенерации веществом слэбов. Полученные данные указывают на присутствие граната, амфибола и рутила в качестве реликтовой фазы в обогащенном мантийном источнике. Исходя из полученных результатов сделан вывод, что обогащенный несовместимыми компонентами источник вещества изученных пород наиболее вероятно был представлен субдукционно модифицированной (при мезозойских и возможно палеогеновых субдукционных событиях) субконтинентальной литосферной мантией ЕМ II типа по вещественному составу, скорее всего, отвечающей рутилсодержащему амфибол-гранатовому перидотиту.

**Ключевые слова:** Малый Кавказ, гаюиновые базаниты, орданшиты, петрология, литосферная мантия, субдукционный компонент, перидотит

**DOI:** 10.31857/S0203030624060075, **EDN:** HYVICG

### ВВЕДЕНИЕ

Сообщение 1 настоящей работы [Бубнов и др., 2024] было посвящено обсуждению полученных нами результатов анализа Sr–Nd–Pb изотопной систематики и изучения геохимических характеристик, уникальных для Кавказского региона, четвертичных гаюиновых базанитов и орданшитов Капанского неовулканического центра, расположенного на территории Армении в пределах юго-восточного окончания Сюникского нагорья (Капанский (Кафанский) тектонический блок). В Сообщении 1 приведены сведения о геологическом строении региона, геологической

организации и возрасте объекта исследований, охарактеризованы методы исследований, рассмотрены особенности вещественного состава изученных щелочных базальтоидов. Выявлено, что четвертичные щелочные базальтоиды Капанского неовулканического центра несут в себе “смешанные” геохимические характеристики, обладая чертами магматических образований различных генетических и геохимических типов, что объяснено их гибридным происхождением. Сделан вывод, что, вследствие отсутствия интенсивного фракционирования минеральных фаз, FC и AFC процессы не являлись определяющими

в становлении геохимического облика вулканитов. На основе совокупности новых Sr–Nd–Pb изотопных и геохимических данных показано, что материнские магмы изученных пород были сформированы в условиях смешения вещества, по меньшей мере, из двух региональных источников — относительно обедненного и существенно обогащенного несовместимыми компонентами. Одним из них являлся умеренно деплетированный региональный плюм-астеносферный источник OIB-типа “Caucasus”, другой — относительно обогащенный радиогенными Sr, Pb и обедненный радиогенным Nd, наиболее вероятно был представлен обогащенной субконтинентальной литосферной мантией EM II типа.

В Сообщении 2 на основе анализа вещественного состава щелочных базальтоидов сделаны принципиальные заключения о природе обогащенного мантийного источника EM II типа, который совместно с региональным плюм-астеносферным источником “Caucasus” принимал участие в формировании материнских магм изученных пород.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### *Природа обогащенного литосферного источника с изотопными характеристиками EM II*

Существуют различные точки зрения на происхождение и уровни локализации обогащенного мантийного компонента EM II. Одни исследователи полагают, что он связан с горячими точками и мантийными плюмами (диапирами) [Yan et al., 2014, Zou, Fan, 2010 и др.], другие рассматривают его как компонент астеносферы [Flower et al., 1992; Pin Yan et al., 2006 и др.], третьи утверждают, что компонент EM II образован из субконтинентальной литосферной мантии SCLM [Hoang, Flower, 1998; Tu et al., 1992 и др.]. Как отмечалось в предыдущей статье в нашем случае изотопные и геохимические данные указывают, вероятнее всего, на литосферную природу обогащенного мантийного источника с изотопными характеристиками EM II, участвовавшего в становлении гибридных материнских магм щелочных базальтов Капанского центра.

Поскольку последние отголоски субдукционного вулканизма в пределах Армении

имели место на рубеже олигоцена—миоцена [Лебедев и др., 2018 и др.] и в четвертичное время мы имеем дело с типичным внутриплитным магматизмом, естественно предположить, что региональный литосферный резервуар с изотопно-геохимическими характеристиками источника EM II по вещественному составу вероятнее всего мог отвечать либо перидотиту (лерцолиту), либо CO<sub>2</sub>-содержащему перидотиту [Green, Wallace, 1988 и др.], либо пироксениту [Lambart et al., 2013 и др.], либо литосферному ресурсу, в составе которого присутствуют как перидотитовая, так и безоливиновая (пироксенитовая) компоненты [Sobolev et al., 2007, 2009 и др.]. Из них в первую очередь следует исключить CO<sub>2</sub>-содержащий перидотит. Известно, что определить концентрацию летучих компонентов (в т.ч. углекислоты) в родоначальных магмах в подавляющем большинстве случаев невозможно вследствие дегазации (обычно приповерхностной) кристаллизующихся магм. Однако А. Заал с соавторами [Saal et al., 2002 и др.] показали, что исходные концентрации CO<sub>2</sub> в недегазированных магмах можно оценить исходя из концентраций в породах Nb — нелетучего элемента близкой несовместимости. Исходя из приведенного в работе [Saal et al., 2002] отношения CO<sub>2</sub>/Nb = 239, содержания CO<sub>2</sub> в недегазированном родоначальном расплаве изученных пород оцениваются в пределах 0.45–0.65 мас. %. Полученные возможные концентрации углекислоты в исходных магмах щелочных базальтоидов Капана гораздо ниже допустимых концентраций CO<sub>2</sub> в расплавах, полученных при низких степенях плавления CO<sub>2</sub>-содержащего перидотита с исходными содержаниями CO<sub>2</sub> от 0.5 до 2.5 мас. % [Green, Wallace, 1988 и др.]. Заметим, что согласно петрохимическим критериям, предложенным в работах [Herzberg, Azimov, 2008; Yang et al., 2019], орданшиты по химическому составу отвечают карбонат-содержащему перидотитовому источнику, а базаниты — бескарбонатному. Не исключая такой модели, мы полагаем, что наличию двух принципиально отличных источников для этих типов пород противоречат, по меньшей мере, минералогические (сходный набор минералов с гаюином) и геологические (близкий возраст и территориальная совмещенность) данные.

Сомнительно также, что первичные расплавы изученных пород были связаны с плавлением безоливинового (пироксенитового) мантийного источника, либо в их составе присутствует как перидотитовая, так и значительная доля пироксенитовой компоненты [Lambart et al., 2013; Sobolev et al., 2007 и др.]. В работах [Sobolev et al., 2007, 2009 и др.] показано, что избыток Ni и недостаток Mn в составе оливина ( $Ol^I$ ) по сравнению с уровнем равновесия с мантийными перидотитами свидетельствует о присутствии в первичных расплавах пород продуктов плавления безоливинового пироксенита. В нашем случае ядерные части вкрапленников этого минерала с геохимическими параметрами “примитивных” магматических оливинов [Плечев и др., 2018 и др.] обладают умеренными концентрациями Ni (от 3790 до 1810 г/т, при  $\mu^{22} = 2790$  г/т) и Mn от 1890 до 920 г/т ( $\mu = 1470$  г/т). Лишь в центре одного оливина ( $Ol$ ) орданшита конуса Кармракар содержание Ni достигает 4630 г/т при завышенной концентрации Mn – 2110 г/т. Эти данные в совокупности с относительно высокими значениями в центральных зонах этих минералов  $100 \times Mn/Fe$  (2.57–1.17 при  $\mu = 1.80$ ), низкими  $Ni/(Mg/Fe)/1000$  (1.10–0.50 при  $\mu = 0.78$ ) и  $100 \times Ni/Mg$  (1.27–0.62 при  $\mu = 0.96$ ) свидетельствуют о доминантно перидотитовом источнике первичных щелочных расплавов Капанского неовулканического центра [Sobolev et al., 2007, 2009 и др.]. На это же указывают и низкие в изученных породах отношения  $CaO/Al_2O_3$ : 0.40–1.06 [Lambart et al., 2013 и др.]. И наконец, в работе [Сущевская и др., 2021] приводятся изотопные характеристики пироксенитового мантийного источника обогащенных магм:  $^{206}Pb/^{204}Pb$ : 17.33–17.37,  $^{207}Pb/^{204}Pb$ : 15.37–15.52,  $^{208}Pb/^{204}Pb$ : 37.40–37.79,  $^{143}Nd/^{144}Nd$ : 0.51249–0.51259 (или –2.89...–0.94 в единицах  $\epsilon_{Nd}$ ) и  $^{87}Sr/^{86}Sr$ : 0.7049–0.7063. Изотопные маркеры этого источника в целом близки к соответствующим параметрам обогащенного мантийного источника ЕМ-I [Rollinson, 1993; Ivanov, 2010 и др.], что в нашем случае практически исключает возможность рассмотрения пироксенитового

мантийного ресурса в качестве обогащенного регионального литосферного резервуара ЕМ II типа. Итак, есть все основания полагать, что в нашем случае мы имеем дело с источником перидотитового и, вероятнее всего, лерцолитового состава.

Как было отмечено в предыдущем сообщении, практически для всех разностей изученных пород фиксируются сильно фракционированный спектр тяжелых РЗЭ (высокие отношения  $(Gd/Yb)_n = 3.23–10.30$ ) (рис. 1), низкие  $Lu/Hf$  (0.05–0.08) и высокие  $Ti/Y$  (316.55–671.72) отношения, которые указывают на присутствие граната ( $Grt$ ) в качестве релаксационной фазы в мантийном источнике. На это же указывает и Nb–Dy–Yb систематика

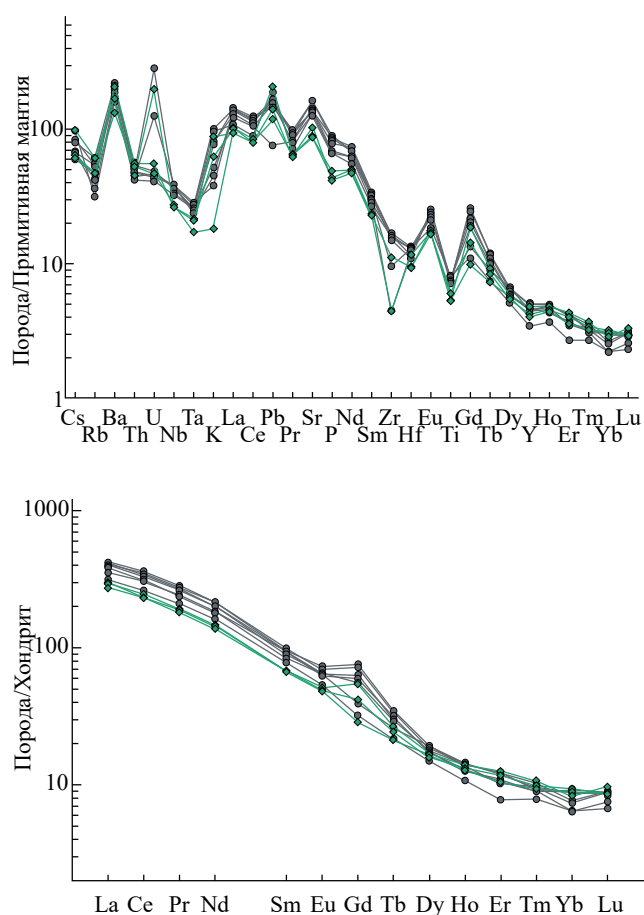


Рис. 1. Мультиэлементная и РЗЭ диаграммы для щелочных базальтоидов Капанского неовулканического центра Малого Кавказа.

Концентрации элементов нормированы к примитивной мантии, по [Sun, McDonough, 1989], РЗЭ – к хондриту, по [Sun, McDonough, 1989].

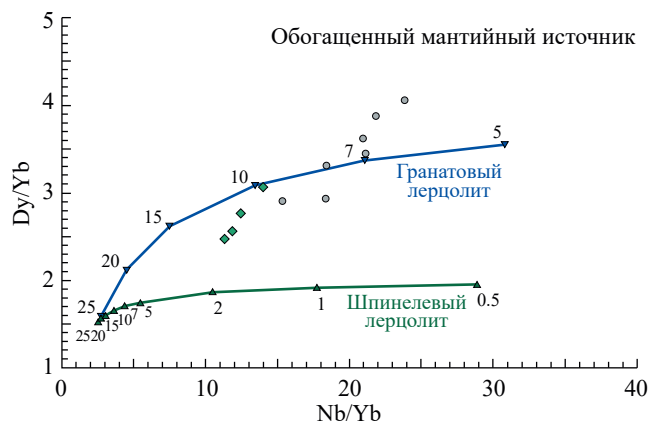
Зеленые ромбы – *Нул-Ол*-базаниты, серые кружки – *Нул-Амр*-тефриты (орданшиты).

<sup>1</sup> Символы минералов даны по [Whitney, 2010].

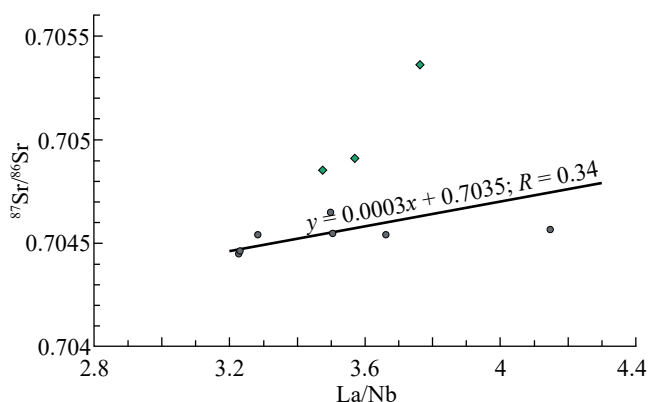
<sup>2</sup>  $\mu$  – среднее арифметическое значений отношения по всей выборке исследуемых пород.

щелочных базальтоидов Капанского центра. Как видно из диаграммы Nb/Yb–Dy/Yb (рис. 2), плавление шпинелевого (Spl) лерцолита обогащенного мантийного источника [Neill et al., 2013; Fitton, Godard, 2004] не может воспроизвести составы щелочных базальтоидов Капанского центра. Напротив, модельная кривая парциального плавления *Grt*-лерцолита [Neill et al., 2013] пересекает поле составов изученных пород при доле плавления обогащенного источника для получения составов материнских магм орданшитов от 6 до 10% и базанитов – от 10 до 15% (см. рис. 2).

С другой стороны, при условии отсутствия масштабного загрязнения коровым материалом, относительно высокие изотопные отношения Sr (0.7045–0.7054) и Pb (для  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  от 18.861 до 18.944, для  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  от 15.611 до 15.643 и для  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  от 38.898 до 38.979) и относительно низкие для Nd (+2.1...+3.0 в единицах  $\epsilon_{\text{Nd}}$ ) в изученных породах, в совокупности с сильными аномалиями LILE по отношению к соседним элементам группы LREE и LREE относительно HFSE (см. рис. 1), чаще всего свидетельствуют о наличии субдукционно модифицированного мантийного источника (скорее всего ЕМ II типа), участвовавшего в генезисе материнских расплавов щелочных базальтоидов. Анализ La–Nb систематики пород приводит к похожему заключению.



**Рис. 2.** Диаграмма Nb/Yb–Dy/Yb [Fitton, Godard, 2004; Workman, Hart, 2005; Neill et al., 2013] для четвертичных щелочных базальтоидов Капанского центра Малого Кавказа. Модельные кривые частичного плавления *Grt*-лерцолита и *Spl*-лерцолита, по [Neill et al., 2013]. Условные обозначения см. рис. 1.



**Рис. 3.** Диаграмма La/Nb– $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  для четвертичных щелочных базальтоидов Капанского центра Малого Кавказа. Условные обозначения см. рис. 1.

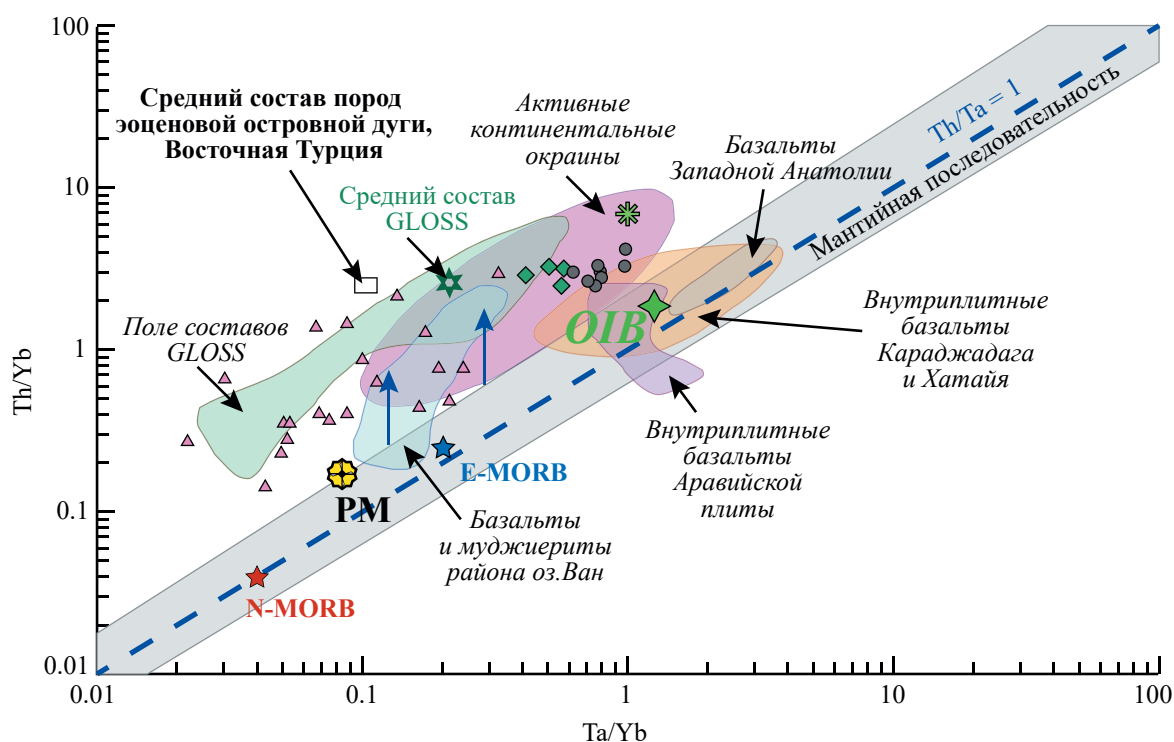
Традиционно считается, что La/Nb отношение в мантийных породах повышенной основности является признаком наличия либо отсутствия субдукционного компонента в источниках их первичных расплавов [Elliot et al., 1997; Ernst et al., 2006 и др.]. Важно заметить, что величина La/Nb отношения в базитах, как правило, не зависит от степени частичного плавления или фракционирования [Allen et al., 2013 и др.]. Значения этого отношения  $<1.4$  отличают базальты имеющие внутриплитную плюмовую природу, значения, превосходящие эту величину, указывают на вклад субдукционной компоненты либо/и загрязнение их первичных расплавов веществом континентальной коры [Condie, 2003; Ernst et al., 2006 и др.]. В изученных породах La/Nb  $\gg 1.4$  (3.2–4.3) (рис. 3), что указывает на обедненность их материнских расплавов Nb (Ta) относительно LILE и легких РЗЭ. При этом щелочные базальтоиды Капана имеют четко выраженные положительные аномалии Sr и Pb (см. рис. 1) – типичный геохимический атрибут надсубдукционных магматитов [Elliot et al., 1997 и др.]. Совокупность этих фактов может указывать на наличие в обогащенном мантийном источнике унаследованной субдукционной компоненты и/или загрязнение материнских магм щелочных базальтоидов Капана коровым материалом. Заметим, что, по мнению ряда исследователей [White, Duncan, 1996 и др.], мантийный резервуар ЕМ II, являющийся нередко основным источником материала для базальтов ОIВ типа, может содержать некоторое количество рециклированного

терригенного материала, в том числе и континентального происхождения.

И наконец, обратимся к диаграмме Ta/Yb–Th/Yb [Pearce, 1983] (рис. 4). Точки составов щелочных пород Капанского центра располагаются вне поля базальтов N-MORB – E-MORB – OIB и ложатся в область составов пород, сформированных чаще всего за счет мантийных источников, содержащих субдукционную компоненту, хотя наши породы в отличие от большинства из них имеют гораздо более высокие Ta/Yb отношения (0.4–1.0). Изученные породы располагаются в “треугольнике” составов GLOSS–OIB–UC и их поле в целом вытянуто вдоль “границы” GLOSS–OIB. Эти данные могут указывать на то, что в их генезисе участвовал субдукционный

материал. Поскольку субдукционные процессы в регионе не были проявлены после миоцена [Лебедев и др., 2018 и др.], “островодужные” геохимические характеристики литосферным мантийным источником были унаследованы в течение прошедших ранее юрско-меловой и возможно палеогеновой субдукций.

“Заражение” мантийных областей магмогенерации субдукционной компонентой обычно связывают либо с дегидратацией измененной океанической коры [Turner, 2002 и др.] и/или субдуцированных отложений [Class et al., 2000; Elburg et al., 2002], либо с их парциальным плавлением [Elliott et al., 1997; Oyan et al., 2017 и др.]. Известно, что некоторые LILE (Sr, Pb, Ba, Rb) мобильны во флюидах, полученных при дегидратации океанической коры и суб-



**Рис. 4.** Диаграмма Ta/Yb–Th/Yb [Pearce, 1983] для четвертичных щелочных базальтоидов Капанского центра (Малый Кавказ).

Поля составов пород GLOSS – [Plank, 2014], активных континентальных окраин – [Pearce, 1983]. Поля составов внутриплитных базальтов Аравийской плиты – [Shaw et al., 2003; Krienitz et al., 2006, 2007; Lustrino, Wilson, 2007], района оз. Ван (Восточная Анатолия) – [Oyan et al., 2017] и областей Караджадаг и Хатай (Турция) – [Parlak et al., 2000; Bağcı et al., 2011; Lustrino et al., 2012; Keskin и др., 2012]. Средний состав пород эоценовой островной дуги, Восточная Турция – [Neill et al., 2013]. Средние составы резервуаров E-MORB, N-MORB, OIB, PM, UC и GLOSS – [Sun, McDonough, 1989; Тейлор, Мак-Леннан, 1988; Plank, 2014].

Зеленые ромбы – Нун-Амп-базаниты; серые кружки – Нун-Амп-тефриты (орданшиты); фиолетовые треугольники – субдукционно-связанные породы юрско-палеогеновых магматических комплексов фундамента Капанской зоны, по [Mederer et al., 2013].



дуцированных осадочных отложений, а легкие РЗЭ и Th подвижны в расплавах, полученных при парциальном плавлении субдуцированного вещества [Elburg et al., 2002 и др.]. Поэтому Ba/La, Rb/Th, Sr/Ce и другие подобные отношения в магмах мантийных источников, обогащенных частичными расплавами из вещества слэбов обычно бывают ниже, чем в магмах, полученных из мантии обогащенной флюидной фазой (Sr/Ce <20, Ba/La <26, Rb/Th <10 [Sheppard, Taylor, 1992; Oyan et al., 2017 и др.]). Щелочные базальтоиды Капанского центра, несмотря на высокие концентрации в них крупноионных литофильных элементов (790–1500 г/т Ba, 20–40 г/т Rb, 1940–3500 г/т Sr), обладают низкими отношениями Ba/La (12.3–20.5), Sr/Ce (12.5–16.6) и Rb/Th (4.9–10.1), что указывает на наличие мантийного источника, обогащенного расплавами, полученными из материала субдуцированных образований, а не мантийного источника, обогащенного флюидами.

Известно, что в мантийных источниках обогащенных субдукционной компонентой обычно присутствует амфибол (*Amp*) или/и флогопит (*Phl*) [Furman, Graham, 1999; Allen et al., 2013; Oyan et al., 2017 и др.]. Коэффициенты распределения Rb и Ba для *Phl* гораздо выше, чем для *Amp* [LaTourette et al., 1995; Furman, Graham, 1999 и др.], что позволяет использовать эти несовместимые элементы и их отношения при решении вопроса о присутствии либо отсутствии *Amp* и/или *Phl* в области мантийного источника [Allen et al., 2013; Oyan et al., 2017 и др.]. Щелочные базальтоиды Капанского центра обладают низкими значениями отношений Rb/Sr (0.007–0.021) и высокими Ba/Rb (30.4–58.2) и на диаграмме Ba/Rb–Rb/Sr (рис. 5) поле их составов вытянуто вдоль “амфиболового” тренда, что указывает на плавление *Amp*-содержащего мантийного источника. Важно отметить, что в большинстве случаев в исследованных породах наблюдается лишь невысокая корреляция между Ba/Rb и MgO (для базанитов  $R = 0.73$ , для орданшитов  $R = 0.56$ ), а также между Ba/Rb и SiO<sub>2</sub> (для базанитов  $R = 0.58$ , для орданшитов  $R = 0.30$ ). Эти факты позволяют полагать, что за данные геохимические особенности, по меньшей мере орданшитов, вероятнее всего ответственен реститовый *Amp* обогащенного

мантийного источника, а не его фракционирование в подводящих каналах и малоглубинных магматических камерах.

Как видно из рис. 1, щелочные базальтоиды Капана характеризуются Nb–Ta, Zr–Hf и Ti отрицательными аномалиями. Считают [Foley et al., 2000; Oyan et al., 2017 и др.], что отрицательные аномалии Nb–Ta отражают условия плавления мантийного источника, при которых в реститовой фазе накапливаются рутил (*Rt*) и/или *Amp*. Вследствие того, что наличие *Amp* в источнике не приводит к фракционированию между Zr–Hf и “соседними” средними редкоземельными элементами (MREE) [Oyan et al., 2017 и др.], этот минерал мы не рассматриваем как фазу, определяющую наличие отрицательных Zr–Hf аномалий, а значит и контролирующую концентрации в расплаве Zr и Hf. В нашем случае практически единственной минеральной фазой, определяющей появление характерных для изученных пород отрицательных аномалий Zr–Hf является *Rt* рестита. Минеральной фазой, контролирующей Ti-минимум, может являться не только *Rt*, но и *Amp*, который вполне может составить конкуренцию *Rt*, в отношении к титану [Xiong et al., 2005; и др.]. Выявлено [Gómez-Tuena et al., 2007; Oyan et al., 2017 и др.], что *Rt* при парциальном плавлении мантийного источника обогащенного субдукционной компонентой может являться доминирующей минеральной фазой, контролирующей

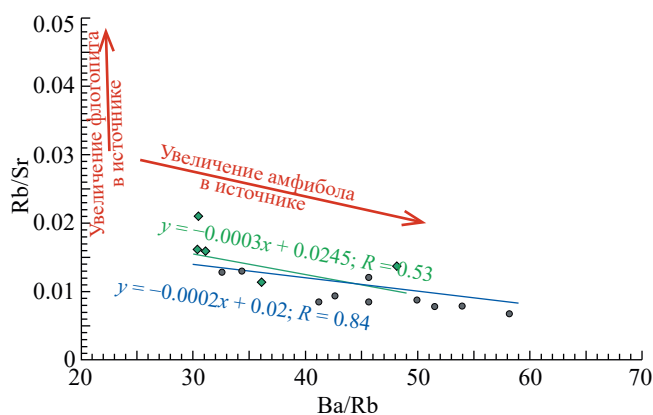


Рис. 5. Диаграмма Ba/Rb–Rb/Sr [Furman, Graham, 1999; Allen et al., 2013; Oyan et al., 2017] для четвертичных щелочных базальтоидов Капанского центра Малого Кавказа. Условные обозначения см. рис. 1.

поведение HFSE и определяющей появление отрицательных Nb-Ta и Zr-Hf аномалий. Это в нашем случае находит свое подтверждение и в аномально высоких в исследованных породах отношениях Nb/Ta (21.1–27.8). В силу этих причин и контроль над Ti-минимумом мы передаем рутилу рестита. В этой связи, необходимо отметить, что до сих пор нет единой точки зрения, объясняющей общие закономерности изменения составов частичных расплавов при плавлении рутилсодержащего перидотита. Опубликованы модельные расчеты и экспериментальные исследования, на основе которых обычно делают вывод, о том что, *Rt* для базальтовых расплавов не может являться остаточной фазой в области мантийного источника вследствие обычно очень низкого содержания в них TiO<sub>2</sub> [Ryerson, Watson, 1987; Borisov, Aranovich, 2020 и др.]. В соответствии с выводами этих авторов, при парциальном плавлении на верхнемантийных уровнях (15–30 кбар при 1000–1200°C) источника с Ti-содержащей фазой для выполнения условий равновесия рутил рестита/основной расплав содержания TiO<sub>2</sub> в расплаве должны составлять 7–10 мас. %. Однако, экспериментальные исследования Т. Грина и Н. Пирсона [Green, Pearson, 1986] показали, что повышенное содержание щелочей существенно снижает растворимость фаз богатых Ti. Так от щелочных к щелочным составам в диапазоне SiO<sub>2</sub> 55–60 мас. % снижение составляет ~1% TiO<sub>2</sub>. Базируясь на данных своих экспериментов, эти авторы утверждают, что для основных расплавов на верхнемантийных глубинах (20–30 кбар) уровень насыщения TiO<sub>2</sub> при 1000°C составляет 2.0 мас. %. При содержании TiO<sub>2</sub> в изученных щелочных базальтоидах до 1.76 мас. % и LOI до 3.93 мас. % последние ограничения (2.0 мас. %) не исключают присутствия *Rt* в обогащенном литосферном источнике Кавказского региона. Заметим, что, несмотря на относительно низкие содержания в изученных породах TiO<sub>2</sub>, наличие в них фенокристов титанового паргасита (TiO<sub>2</sub> до 3.50 мас. %) и авгита с TiO<sub>2</sub> до 3.80 мас. % может указывать на значительные концентрации в первичных расплавах титана, а значит и на высокую вероятность присутствия среди реститовых фаз *Rt* — минерала-концентратора Ti, Nb, Ta и, хотя в меньшей степени, но

и Zr с Hf. И наконец, отметим, что оксиды с высоким содержанием Ti (рутил, армалколит, ильменит) были непосредственно обнаружены в мантийных лерцолитовых ксенолитах из щелочных базальтов на севере Сихотэ-Алиня, в хребте Хамар-Дабан к югу от озера Байкал, а также в гарцбургитовых нодулях с островов Кергелен (Индийский океан) [Ionov et al., 1999; Kalfoun et al., 2002 и др.].

Итак, геохимический облик щелочных базальтоидов Капанского центра склоняет нас к выводу о том, что наиболее вероятно региональный обогащенный литосферный источник ЕМ II типа насыщенный “древней” субдукционной компонентой был представлен рутилсодержащим амфибол-гранатовым перидотитом. Отметим, что приведенные данные и их интерпретация не исключают принципиальной возможности участия в петрогенезисе изученных пород амфиболсодержащих эклогитов (возможно коллизионных) с рутилом в качестве дополнительной фазы, скорее всего выведенных на уровни мантийной магмогенерации в результате дочетвертичной масштабной даламинации.

Таким образом, изотопные и геохимические данные указывают на то, что в петрогенезисе щелочных пород Капанского центра участвовал субдукционно модифицированный обогащенный мантийный литосферный источник, наиболее вероятно ЕМ II типа, по вещественному составу отвечающий рутилсодержащему амфибол-гранатовому перидотиту (лерцолиту). Наш вывод находится в определенном противоречии с утверждением Х. Меликсетяна с соавторами [Меликсетян и др., 2019], о том, что капанские новейшие магмы были сформированы в “области оливин-шпинелевого парагенезиса мантийных пород (OSMA)”. Это заключение, прежде всего, основано на анализе особенностей химизма включений хромшпинелида во вкрапленниках оливина капанских лав. Подобный анализ оливин-шпинелевых парагенезисов, заметим, традиционно используется для определения характера (истощенный — обогащенный) мантийного источника и степени плавления мантийного субстрата [Arai, 1992, 1994 и др.]. Опубликованные в статье Х. Меликсетяна с соавторами аналитические данные и

расположение поля составов щелочных базальтоидов Капана на диаграмме  $Cr^{\#}$  ( $Cr^{\#} = Cr/(Cr+Al)$ ) включений хромшпинелида – Fo (mol. %) оливина-хозяина указывают на обедненный мантийный источник при этом степень его плавления может быть оценена как 15–35%, что малореалистично для образования щелочных расплавов, давших базаниты и орданшиты Капанского центра.

Заметим, что в целом к созвучным нам выводам о природе и вещественном составе источников неоген-четвертичных магматических образований пришел ряд исследователей молодого магматизма Кавказского региона и смежных вулканических провинций. Так, метасоматизированный резервуар, состоящий из *Amp-Rt*-содержащих гранатовых перидотитов, расположенный в переходной зоне между литосферной и астеносферной мантией, рекомендуют В. Оян с соавторами [Oyan et al., 2017] в качестве главного источника четвертичных основных вулканитов района озера Ван (Турция). Близкий по составу литосферный источник (*Grt-Amp*-перидотит с *Rt*), по мнению М. Аллена с соавторами [Allen et al., 2013], являлся основным материальным ресурсом при генерации материнских магм четвертичных основных лав Курдистана (Иран). Интересно отметить, что в свое время А. Зиндлер и С. Харт [Zindler, Hart, 1986] отмечали ЕМ II подобные изотопные характеристики (особенно в отношении изотопных отношений Pb) у молодых щелочных базальтов в Иране. И, наконец, П. Сугден с соавторами [Sugden et al., 2019] полагают, что субдукционный компонент является вообще индикаторной особенностью литосферной мантии всей Малокавказской магматической провинции, который вероятнее всего был унаследован от субдукции океана Тетис до начала континентальной коллизии в позднем миоцене.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе изложенных в первом и втором сообщениях статьи новых и ранее опубликованных петрологических данных и их интерпретаций выявлено, что гаюинсодержащие четвертичные щелочные базальтоиды Малого Кавказа несут в себе “смешанные”

геохимические характеристики благодаря их гибриднему происхождению. Установлено, что фракционирование не играло существенной роли в создании геохимического облика пород.

Показано, что Sr–Nd–Pb изотопные характеристики щелочных пород отражают соответствующие параметры вещества, образованного из двух типов региональных источников: относительно обедненного и существенно обогащенного несовместимыми компонентами. Скорее всего, первый источник – обладающий региональной геохимической спецификой, астеносферный (плюм-астеносферный) умеренно деплетированный PREMA- либо COMMON-подобный резервуар. Наиболее вероятным резервуаром этого типа является региональный мантийный источник “Caucasus”. Источник вещества, обогащенного радиогенными Sr, Pb и обедненного радиогенным Nd, наиболее вероятно был представлен субдукционно модифицированной (при мезозойских и возможно палеогеновых субдукционных событиях) литосферной мантией ЕМ II типа по вещественному составу, скорее всего, отвечающей рутилсодержащему амфибол-гранатовому лерцолиту.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы бережно сохраняют память о безвременно ушедшем основателе и многолетнем директоре Центра эколого-ноосферных исследований НАН Республики Армения (CENS) д.г.-м.н. профессоре Армене Карленовиче Сагателяне. Его всесторонняя поддержка и неоценимая помощь сотрудников Экоцентра в русле научного сотрудничества с ИГЕМ РАН обеспечивали возможность плодотворных совместных исследований и проведению полевых работ в ареалах развития молодого магматизма Армении.

Корректность формулировок и содержание статьи значительно улучшились в результате конструктивных замечаний и предложений рецензентов статьи.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ.

Исследования выполнены в рамках госзадания лаборатории Петрографии ИГЕМ РАН (проект № 124022400143-9).



# КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бубнов С.Н., Гольцман Ю.В., Кондрашов И.А., Олейникова Т.И., Докучаев А.Я. Источники расплавов четвертичных гаюиновых щелочных базальтоидов Малого Кавказа. Сообщение 1. Результаты геохимических и изотопных (Sr–Nd–Pb) исследований // Вулканология и сейсмология. 2024. № 6. С. 55–79.
- Keskin M., Чугаев А.В., Лебедев В.А. и др. Геохронология и природа мантийных источников позднекайнозойского внутриплитного магматизма фронтальной части Аравийской плиты (неокайнозойская область Караджадаг, Турция). Сообщение 2. Результаты геохимических и изотопных (Sr–Nd–Pb) исследований // Вулканология и сейсмология. 2012. № 6. С. 41–70.
- Лебедев В.А., Чернышев И.В., Сагателян А.К. и др. Миоплиоценовый вулканизм Центральной Армении: геохронология и роль AFC-процессов в петрогенезисе магм // Вулканология и сейсмология. 2018. № 5. С. 18–42.
- Лебедев В.А., Чернышев И.В., Чугаев А.В. и др. Геохронология извержений и источники вещества материнских магм вулкана Эльбрус (Большой Кавказ): результаты K–Ar и Sr–Nd–Pb изотопных исследований // Геохимия. 2010. № 1. С. 45–73.
- Меликсетян Х., Никогосян И., Джрбашян Р. и др. Четвертичный моногенный вулканизм Капанского блока: вулканология, геохронология и геохимия (ЮВ часть Республики Армения) // Известия НАН РА. Науки о Земле. 2019. Т. 72. № 2. С. 19–42.
- Плечов П.Ю., Щербаков В.Д., Некрылов Н.А. Экстремально магнезиальный оливин в магматических породах // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 12. С. 2129–2147.
- Сущевская Н.М., Соболев А.В., Лейченко Г.Л. и др. Роль пироксенитовой мантии в формировании расплавов мезозойского плюма Кара (по результатам изучения магматических пород западной части Земли Королевы Мод, Восточная Антарктида) // Геотектоника. 2021. Т. 66. № 4. С. 308–328.
- Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 384 с.
- Allen M.B., Kheirkhah M., Neill I. et al. Generation of Arc and Within-plate Chemical Signatures in Collision Zone Magmatism: Quaternary Lavas from Kurdistan Province, Iran // J. Petrol. 2013. V. 54. № 5. P. 887–911.
- Arai S. Characterisation of spinel peridotites by olivine–spinel compositional relationships: review and interpretation // Chem. Geol. 1994. V. 113. P. 191–204.
- Arai S. Chemistry of chromian spinel in volcanic rocks as a potential guide to magma chemistry // Mineral. Magazine. 1992. V. 56. P. 173–184.
- Bagcı U., Alpaslan M., Frei R. et al. Different degrees of partial melting of the enriched mantle source for Plio-Quaternary basic volcanism, Toprakkale (Osmaniye) region, southern Turkey // Turkish Journal of Earth Sciences. 2011. V. 20. P. 115–135.
- Borisov A., Aranovich L. Rutile solubility and TiO<sub>2</sub> activity in silicate melts: An experimental study // Chemical Geology. 2020. V. 556. P. 1–13.
- Class C., Miller D.M., Goldstein S.L., Langmuir C.H. Distinguishing melt and fluid subduction components in Umnak volcanics: Aleutian arc // Geochem. Geophys. Geosys. 2000. V. 1. P. 1–34.
- Condie K. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // Lithos. 2005. V. 79. P. 491–504.
- Elburg M. A., Bergen M. V., Hoogewerff J. et al. Geochemical trends across an arc–continent collision zone: magma sources and slab–wedge transfer processes below the Pantar Strait volcanoes, Indonesia // Geochim. Cosmochim. Acta. 2002. V. 66. P. 2771–2789.
- Elliot T., Plank T., Zindler A. et al. Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc // J. of Geophys. Res. 1997. V. 102. P. 14991–15019.
- Ernst R.E., Pease V., Puchkov V.N. et al. Geochemical characterization of Precambrian magmatic suites of the southeastern margin of the East European craton, Southern Urals, Russia // Геологический сборник № 5 Института геологии УНЦ РАН. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2006. С. 119–161.
- Fitton J.G., Godard M. Origin and evolution of magmas on the Ontong Java Plateau // Origin and Evolution of the Ontong Java Plateau. 2004. V. 229. Geological Society of London Special Publication. P. 151–178.
- Flower M.F.J., Zhang M., Chen C.-Y. et al. Magmatism in the South China Basin 2. Post-spreading Quaternary basalts from Hainan Island, South China // Chemic. Geology. 1992. V. 97. P. 65–87.
- Foley S.F., Barth M.G., Jenner G.A. Rutile/melt partition coefficients for trace elements and an assessment of the influence of rutile on the trace element characteristics of subduction zone magmas // Geochim. Cosmochim. Acta. 2000. V. 64. P. 933–938.
- Furman T., Graham D. Erosion of lithospheric mantle beneath the East African Rift system: geochemical evidence from the Kivu volcanic province // Lithos. 1999. V. 48. P. 237–262.

- Gómez-Tuena A., Langmuir C.H., Goldstein S.L. et al.* Geochemical evidence for slab melting in the Trans-Mexican Volcanic Belt // *J. Petrol.* 2007. V. 48. P. 537–562.
- Green D.H., Wallace M.E.* Mantle metasomatism by ephemeral carbonatite melts // *Nature.* 1988. V. 336. P. 459–462.
- Green T.H., Pearson N.* Ti-rich accessory phase saturation in hydrous mafic–felsic compositions at high P, T // *Chemical Geology.* 1986. V. 54. P. 185–201.
- Herzberg C., Asimow P.D.* Petrology of some oceanic island basalts: PRIMELT2.XLS software for primary magma calculation // *Geochem. Geophys. Geosys.* 2008. V. 9. № 9. P. 1–25.
- Hoang N., Flower M.F.* Petrogenesis of Cenozoic basalts from Vietnam: implication for origins of a “diffuse igneous province” // *J. Petrol.* 1998. V. 39. № 3. P. 369–395.
- Ionov D., Gregoire M., Prikhodko V.* Feldspar-Ti-oxide metasomatism in off-cratonic continental and oceanic upper mantle // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1999. V. 165. P. 37–44.
- Ivanov A.V.* Deep-level geodynamics: boundaries of the process according to geochemic and petrologic data // *Geodynamics & Tectonophysics.* 2010. V. 1. № 1. P. 87–102.
- Kalfoun F., Ionov D., Merlet C.* HFSE residence and Nb/Ta ratios in metasomatised, rutile-bearing mantle peridotites // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2002. V. 199. P. 49–65.
- Krienitz M.S., Haase K.M., Mezger K. et al.* Magma genesis and crustal contamination of continental intraplate lavas in northwestern Syria // *Contributions to Mineralogy and Petrology.* 2006. V. 151. P. 698–716.
- Krienitz M.S., Haase K.M., Mezger K. et al.* Magma genesis and mantle dynamics at the Harrat Ash Shamah Volcanic Field (Southern Syria) // *J. Petrol.* 2007. V. 48. P. 1513–1542.
- Lambart S., Laporte D., Schiano P.* Markers of the pyroxenite contribution in the major-element compositions of oceanic basalts: Review of the experimental constraints // *Lithos.* 2013. V. 160–161. P. 14–36.
- LaTourette T., Hervig R.L., Holloway J.R.* Trace element partitioning between amphibole, phlogopite, and basanite melt // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1995. V. 135. P. 13–30.
- Lustrino M., Wilson M.* The circum-Mediterranean anorogenic Cenozoic igneous province // *Earth-Science Reviews.* 2007. V. 81. P. 1–65.
- Lustrino M., Keskin M., Mattioli M. et al.* Heterogeneous mantle sources feeding the volcanic activity of Mt. Karacadag (SE Turkey) // *Journal of Asian Earth Sciences.* 2012. V. 46. P. 120–139.
- Neill I., Meliksetian Kh., Allen M.B. et al.* Pliocene-Quaternary volcanic rocks of NW Armenia: magmatism and lithospheric dynamics within an active orogenic plateau // *Lithos.* 2013. V. 180–181. P. 200–215.
- Oyan V., Keskin M., Lebedev V.A. et al.* Petrology and geochemistry of the Quaternary mafic volcanism to the NE of Lake Van, eastern Anatolian collision zone, Turkey // *J. Petrol.* 2017. V. 58. № 9. P. 1701–1728.
- Parlak O., Delaloye M., Kozlu H. et al.* Trace element and Sr–Nd isotope geochemistry of the alkali basalts observed along the Yumurtalik Fault (Adana) in southern Turkey // *Yerbilimleri.* 2000. V. 22. P. 137–148.
- Pearce J.A.* Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins // *Continental Basalts and Mantle Xenoliths.* U.K.: Shiva Press, 1983. P. 230–249.
- Pin Yan, Deng H., Liu H. et al.* The temporal and spatial distribution of volcanism in the South China Sea region // *J. Asian Earth Sci.* 2006. V. 27. P. 647–659.
- Plank T.* The chemical composition of subducting sediments // *Treatise on Geochemistry.* 2nd ed. Oxford: Elsevier, 2014. V. 4. P. 607–629.
- Rollinson H.R.* Using geochemical data. Evaluation, presentation, interpretation. London: Longman, 1993. 379 p.
- Ryerson F., Watson E.* Rutile saturation in magmas; implications for Ti–Nb–Ta depletion in island-arc basalts // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1987. V. 8. P. 225–239.
- Saal A.E., Hauri E.H., Langmuir S.H., Perfit M.R.* Vapour undersaturation in primitive mid-ocean-ridge basalt and the volatile content of Earth’s upper mantle // *Nature.* 2002. V. 419. P. 451–455.
- Shaw J.E., Baker J.A., Menzies M.A. et al.* Petrogenesis of the largest intraplate volcanic field on the Arabian Plate (Jordan): a mixed lithosphere–asthenosphere source activated by lithospheric extension // *J. Petrol.* 2003. V. 44. P. 1657–1679.
- Sheppard S., Taylor W.R.* Barium- and LREE-rich, olivine–mica–lamprophyres with affinities to lamproites, Mt. Bundey, Northern Territory, Australia // *Lithos.* 1992. V. 28. P. 303–325.
- Sobolev A.V., Hofmann A.W., Kuzmin D.V. et al.* The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts // *Science.* 2007. V. 316(5823). P. 412–417.
- Sobolev A.V., Sobolev D.V., Kuzmin D.V. et al.* Siberian meimechites: origin and relation to flood basalts and kimberlites // *Russian Geology and Geophysics.* 2009. V. 50. P. 999–1033.
- Sugden P.J., Savov I.P., Wilson M. et al.* The Thickness of the Mantle Lithosphere and Collision-Related Volcanism in the Lesser Caucasus // *J. Petrol.* 2019. V. 60. № 2. P. 199–230.
- Sun Shen-su, McDonough W.F.* Chemical and Isotopic Systematics of oceanic basalts: implications for Mantle Composition and Processes // *Magmatism in the Ocean*

- Basins Spec. Publ. Vol. Geol. Soc. London. 1989. № 42. P. 313–345.
- Tu K., Flower M.F.J., Carison R.W., Xie G. H. et al. Magmatism in the South China Basin: I, Isotopic and trace element evidence for an endogenous Dupal mantle component // *Chem. Geol.* 1992. V. 97. P. 47–63.
- Turner S.P. On the time-scales of magmatism at island-arc volcanoes // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London.* 2002. Series A 360. P. 2853–2871.
- White W.M., Duncan R.A. Geochemistry and geochronology of the Society Island: new evidences for deep mantle recycling / Eds A. Basu, S.R. Hart // *Earth Processes: Reading the Isotopic Code. AGU Geophysical Monograph Series.* 1996. V. 95. P. 183–206.
- Whitney D.L., Evans B.W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // *Amer. Mineral.* 2010. V. 95. P. 185–187.
- Workman R.K., Hart S.R. Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM) // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2005. V. 231. P. 53–72.
- Xiong X.L., Adam J.D., Green T.H. Rutile stability and rutile/melt partitioning during partial melting of hydrous basalt: implication for TTG genesis // *Chem. Geol.* 2005. V. 218. P. 339–359.
- Yan Q., Shi X., Castillo P.R. The late Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution of the South China Sea: A petrologic perspective // *Journal of Asian Earth Sciences.* 2014. V. 85(2). P. 178–201.
- Yang Z.F., Li J., Jiang Q.B. et al. Using Major Element Logratios to Recognize Compositional Patterns of Basalt: Implications for Source Lithological and Compositional Heterogeneities // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth.* 2019. V. 124(4). P. 3458–3490.
- Zindler A., Hart S. Chemical geodynamics // *Annu. Rev. Earth and Planet. Sci.* 1986. V. 14. P. 493–571.
- Zou H., Fan Q. U-Th isotopes in Hainan basalts: Implications for sub-asthenospheric origin of EM2 mantle end-member and the dynamics of melting beneath Hainan Island // *Lithos.* 2010. V. 116(1–2). P. 145–152.

## Sources of the Melts of Quaternary Hauyne Alkaline Basaltoids in the Lesser Caucasus. Communication 2. The Nature of the Enriched Lithospheric Source

S. N. Bubnov\*, Yu. V. Goltsman, I. A. Kondrashov, T. I. Oleinikova, and A. Ya. Dokuchaev

*Institute of Geology of ore Deposits, Petrography, Geochemistry, and Mineralogy RAS,  
Staromonetny lane, 35, Moscow, 119017 Russia*

*\*e-mail: bubnov@igem.ru*

Geochemical and isotopic–geochemical (Sr–Nd–Pb) data on the quaternary intraplate hauyne basanites and ordanshites in the Lesser Caucasus provide an insight into the most probable nature (characteristics of the composition and the depth of occurrence) of the EM II type enriched mantle source, from which, along with the Caucasus OIB-type plume–asthenospheric source, the parental melts of the rocks were derived. The source of the type was demonstrated to have been modified by a subduction-related component. Data are presented on the likely timing and mechanisms of contamination of the magma-generation regions with slab material. Our data suggest that the residue in the mantle source contained garnet, amphibole, and rutile. Our results led us to conclude that the source enriched in incompatible elements was most probably subduction-modified (in the course of Mesozoic and, perhaps, also Paleogene subduction events) subcontinental lithospheric mantle of the EM II type, which likely corresponded to rutile-bearing amphibole–garnet peridotite.

**Keywords:** Lesser Caucasus, hauyne basanites, ordanshites, petrology, lithospheric mantle, subduction-related component, peridotite