

К ВОПРОСУ О ПЕТРОГЕНЕЗИСЕ ПИКРИТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ БАШКИРСКОГО МЕГАНТИКЛИНОРИЯ

© 2018 г. С. Г. Ковалев, С. И. Высоцкий, С. С. Ковалев

Реферат. В работе приводятся новые данные об условиях формирования магматических пород западного склона Южного Урала и прилегающей части Восточно-Европейской платформы. На основе расчетов *P-T* параметров плавления мантийного субстрата показано, что при реализации плюмового процесса образуются однотипные породы (пикриты и пикродолериты), генезис которых принципиально различен. Первый тип является результатом кристаллизации недифференцированного мантийного расплава в верхних горизонтах коры, второй — образуется в результате дифференциации в крупных внутрикоровых магматических камерах/очагах.

Ключевые слова: плюм, магматический расплав, *P-T* параметры, пикриты, пикродолериты, западный склон Южного Урала, дифференциация, оливин-пироксеновый геотермометр, средний рифей

ON THE PETROGENESIS OF PICRITE COMPLEXES IN THE BASHKIRIAN MEGANTICLINORIUM

S. G. Kovalev, S. I. Vysotsky, S. S. Kovalev

Abstract. The paper presents new data on the conditions of formation of igneous rocks in the western slope of the Southern Urals and the adjacent part of the East European platform. Calculations of *P-T* mantle melting parameters show that the implementation of plume process results in formation of one-type rocks (picrites and picrodolerites), but their genesis may be fundamentally different. One kind is the result of crystallization of undifferentiated mantle melt in the upper layers of the crust, while the other is formed by differentiation in large intracrustal magma chambers.

Keywords: plume, magmatic melt, *P-T* parameters of picrites, picrodolerites, the western slope of the Southern Urals, differentiation, olivine, pyroxene geothermometer, Middle Riphean

Введение

Представление о том, что формирование крупных магматических провинций (LIPs) связано с плюмами/суперплюмами, распространено в настоящее время достаточно широко и подтверждается многочисленными фактами и наблюдениями [Добрецов и др., 2010; Puchkov et al., 2013; Пучков, Ковалев, 2013; Ernst, 2014]. Вместе с тем проблема разнообразия формационно-генетических типов магматических пород, формирующихся в верхних горизонтах континентальной коры, остается недостаточно изученной.

В рифейской истории западного склона Южного Урала среднерифейский этап является временем с максимальным развитием магматизма на обширной территории преимущественно в интрузивной форме с повышенной основностью пород (пикриты, пикродолериты, дайки меланократовых габбро-долеритов). Кроме того, ранее было показано, что «машакское магматическое событие» в виде вулканитов, дайковых роев и глубинных интрузий распространилось далеко за пределы Башкирского мегантиклинория (Восточно-Европейская платформа, Тиман, Гренландия, Сибирский кратон) и представляет собой событие субглобального

Для цитирования: Ковалев С.Г., Высоцкий С.И., Ковалев С.С. К вопросу о петрогенезисе пикритовых комплексов Башкирского мегантиклинория // Геологический вестник. 2018. № 3. С. 98–108. DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2018-3-7>.

For citation: Kovalev S.G., Vysotsky S.I., Kovalev S.S. On the petrogenesis of picrite complexes in the Bashkirian meganticlinorium // Geologicheskii vestnik. 2018. No.3. P.98–108. DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2018-3-7>.

масштаба, свидетельствующее о его плюмовой/ суперплюмовой природе [Пучков, Ковалев, 2013]. На сегодняшний день к среднему рифею в пределах региона относятся долериты Главной Бакальской дайки, Повальненский и Кургаский габбро-долеритовые комплексы, Лапыштинский и Ишлинский пикрит-долеритовый и пикритовый комплексы, Машакский и Шатакский пикрит-базальт-риолитовые комплексы, Кусинско-Копанский расслоенный пироксенит-габбровый комплекс, отдельные дайковые и пластовые тела интрузивных габбро-долеритов и пикритов, вскрытых скважинами на востоке Восточно-Европейской платформы, а также Бердяушский плутон гранитов рапакиви, Ахмеровский гранитный комплекс, Авашлинский комплекс высококалийевых и титанистых меланократовых сиенитов и сложно построенный трахи-

андезит-базальт-сиенит-карбонатитовый комплекс «Сибирка» (рис. 1).

Методы исследования минералов

Изучение минералов Ишлинских и Шатакских пикритов проводилось на растровом электронном микроскопе РЭММ-202М с EDA в Институте минералогии УрО РАН (г. Миасс). Порог обнаружения в зависимости от элемента составляет от 0.1 до 0.3 мас. %.

Изучение породообразующих минералов по скв. № 7 проводилось в лаборатории локальных методов исследования вещества Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова на кафедре петрологии на растровом (сканирующем) электронном микроскопе (РЭМ) Jeol JSM-6480LV

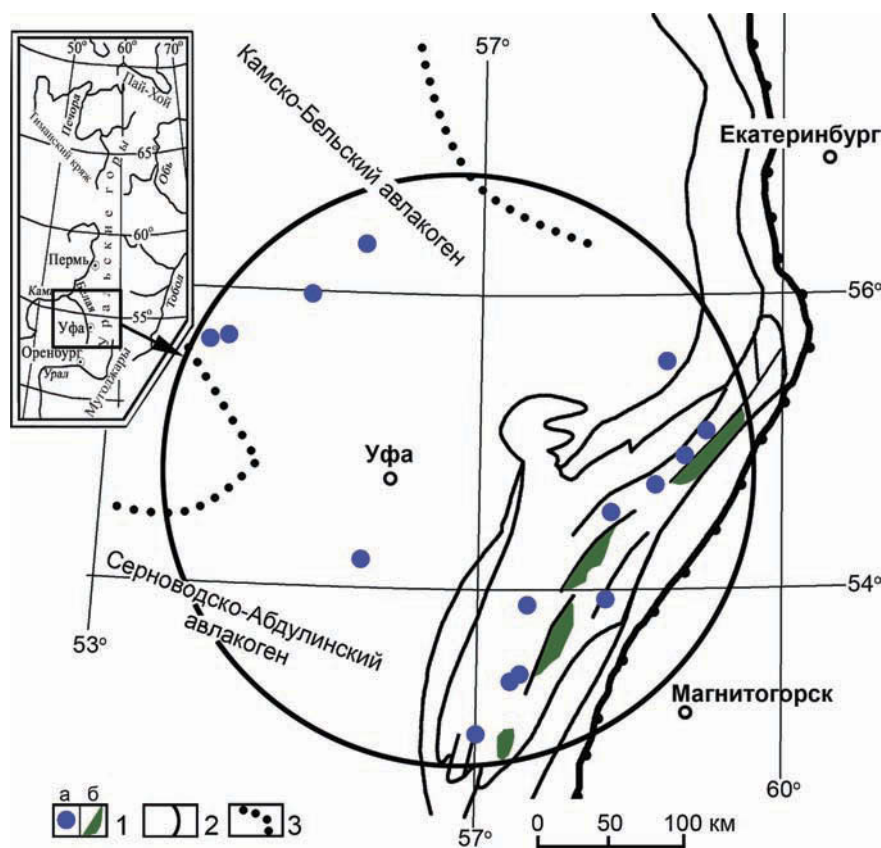


Рис. 1. Схема распространения магматических пород среднерифейского возраста в пределах западного склона Южного Урала и прилегающей части Восточно-Европейской платформы [Ковалев и др., 2017]

Условные обозначения: 1 — магматические породы (а — интрузивные, б — эффузивные); 2 — условные границы области распространения среднерифейского магматизма; 3 — границы аэлакогенов.

Fig. 1. The development of magmatic rocks of the Middle Riphean age within the western slope of the Southern Ural and the adjacent part of the East European platform. By [Kovalev et al., 2017]

Legend: 1 — igneous rocks (a — intrusive, б — effusive); 2 — conditional boundaries of the area of distribution of Middle Riphean magmatism; 3 — boundaries of aulacogenes.

с энергодисперсионным анализатором INCA-Energy 350. Минимальная идентифицируемая концентрация (порог обнаружения) в зависимости от элемента составляет от 0.12 до 0.3 мас. %.

Для проверки корректности содержаний Са в оливинах были использованы данные по Ишлинскому комплексу [Носова и др., 2012], полученные с помощью микроанализатора SAMEBAH-SX100 фирмы Cameca в ГЕОХИ РАН (г. Москва). Порог обнаружения элемента 0.02 мас. %, погрешность измерения ± 20 отн. %.

Геология пикритовых комплексов

Согласно современным представлениям, все разнообразие, в первую очередь, пород основного состава можно объяснить степенью плавления мантийного субстрата при вариациях P - T параметров среды магмообразования. При этом, как правило, для разновозрастных пространственно сближенных комплексов различной формационной природы (пикриты, габбро, долериты и др.) рассчитываются свои параметры очагов магмогенерации, что, по нашему мнению, нецелесообразно. В данной работе формирование различных формационно-генетических типов пород при развитии «плюмового события» рассматривается как единый процесс, обусловленный плавлением мантийного вещества и его взаимодействием с субстратом коры. В качестве объектов исследования рассмотрены пикритовые и пикродолеритовые породы среднерифейского возраста, входящие в состав Ишлинского пикритового, Шатакского пикрит-риолит-базальтового комплексов и Кусинско-Копанского расслоенного гранит-пироксенит-габбрового комплекса, представленного оливиновыми габбро (пикритами), вскрытыми скв. № 7.

Ишлинский пикритовый комплекс, относимый ранее к плагиоклазовым перидотитам палеозойского возраста, представлен тремя разобщенными выходами («Курманайская дайка», Ишлинские пикриты и пикриты руч. Интурат), протягивающимися в субмеридиональном направлении более чем на 8–10 км. Для пород характерны порфиroidные, неравномернозернистые, часто пойкилитовые, близкие к кумулятивным структуры (рис. 2а–г) с идиоморфными и субидиоморфными кристаллами оливина (20–50 об. %) и пироксенов (40–50 об. %), «цементированные» ксеноморфными и субидиоморфными кристаллами основного плагиоклаза. Размер зерен темноцветных минералов меняется от 2.0–2.5 мм до сотых долей мм.

Порфиroidные вкрапленники оливина пикритов представлены субидиоморфными и ксеноморфными кристаллами с размерами 0.2–2 мм. Ксеноморфные зерна вытянуты, имеют неправильные заливообразные либо угловатые и изометричные очертания. Кристаллы оливина зональны, их магнезиальность уменьшается от центральных частей к краям зерен. По величинам $Mg\#$ ($Mg\# = Mg/(Mg+FeO)$) выделяется 3 группы кристаллов со средними значениями этого параметра: 0.90, 0.86, 0.81, при максимальном и минимальном значениях — 0.91 и 0.78 соответственно.

Порфиroidные зерна клино- и ортопироксенов часто образуют сростания и совместно нарастают на кристаллы оливина. Клинопироксены обладают концентрической зональностью, нередко в них наблюдаются структуры распада. Кроме кристаллов-вкрапленников, пироксены присутствуют в основной массе в виде мелких (доли мм) ксеноморфных образований, заполняя промежутки между длиннопризматическими зернами плагиоклаза.

Среднее значение параметра $Mg\#$ для вкрапленников клинопироксена равно 0.84 при колебаниях от 0.81 до 0.85. Средняя магнезиальность пироксенов основной массы равна 0.76.

В качестве второстепенных минералов в породах присутствуют высокомагнезиальный биотит и коричневая роговая обманка. Акцессорные минералы — апатит, ильменит, магнетит, хромшпинелид.

Отнесение пород комплекса к среднему рифею основано на определении возраста Sm-Nd по трем валовым пробам и трем монофракциям пироксенов из них, которое показало цифру 1270 \pm 56 млн лет (СКВО = 1.11), а аппроксимация точек (валовая проба, клинопироксен, ортопироксен) одного образца дала изохрону с наклоном, отвечающим $T = 1291\pm 67$ млн лет (СКВО = 0.66) [Сазонова и др., 2011; Носова и др., 2012].

Магматические породы *Шатакского комплекса* представлены пикритами, базальтами и риолитами. Пикриты образуют пластовую интрузию, расположенную в основании машакской свиты на ее непосредственной границе с подстилающими отложениями юшинской свиты (RF_1) [Ковалев и др., 2013]. Макроскопически породы сложены зеленовато-серыми, темно-зелеными среднезернистыми амфиболизированными разновидностями, имеющими массивную текстуру и видимую мощность около 25–30 м. Детальное изучение позволило выделить в строении интрузии три зоны:

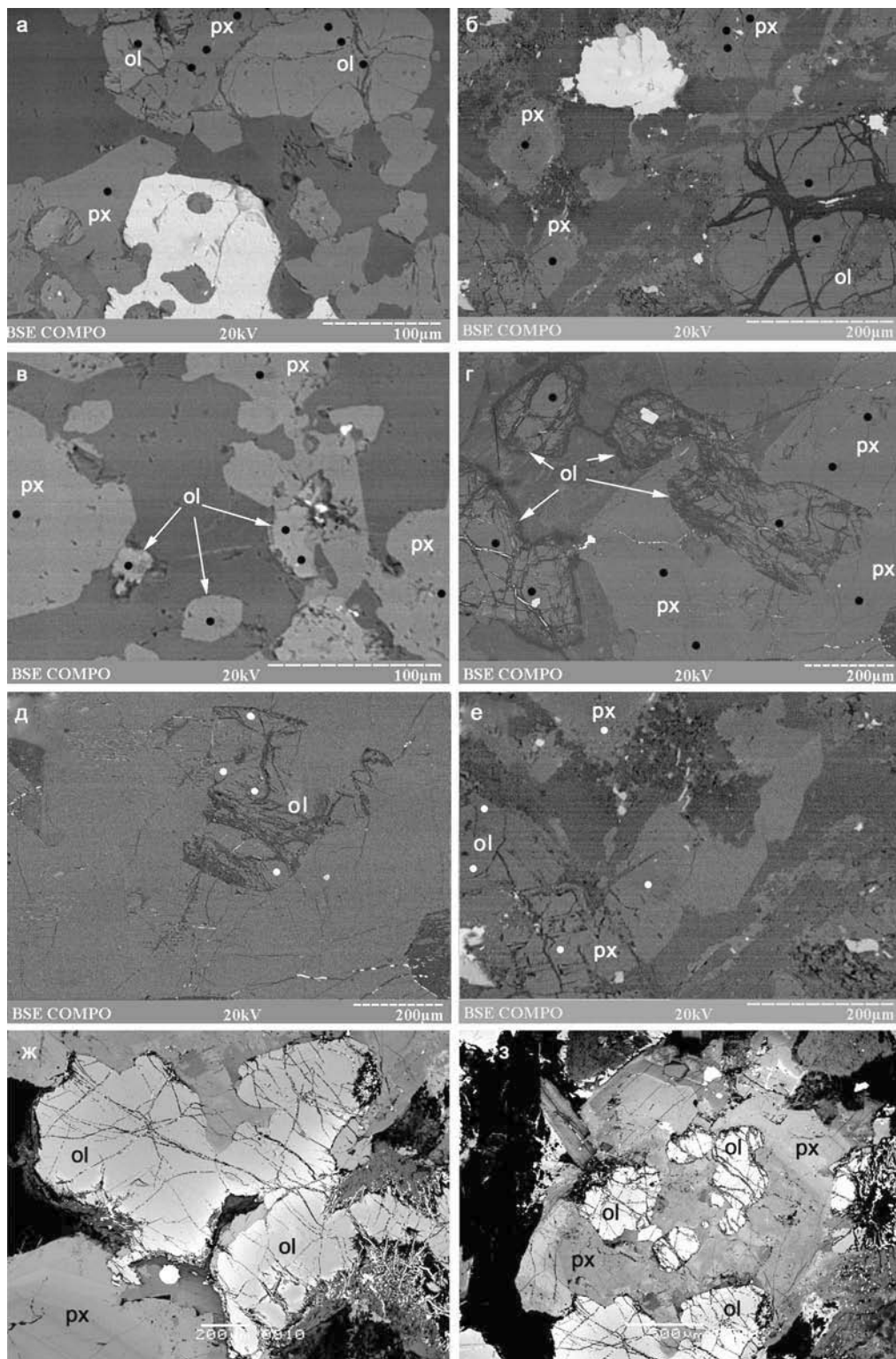


Рис. 2. Микрофотографии морфологии кристаллов оливина и клинопироксена в Ишлинских пикритах (а, б), пикритах «Курманайской дайки» (в, г), пикритах Шатакского комплекса (д, е) и породах скв. № 7 (ж, з)

Примечание: ol — оливин; px — клинопироксен.

Fig. 2. Microphotographs of the morphology of olivine and clinopyroxene crystals in the Ishlya picrites (a, б), picrites of the Kurmanai dike (в, г), picrites of the Shatak complex (д, е) and borehole rocks No. 7 (ж, з)

Notes: ol — olivine; px — clinopyroxene.

нижнюю эндоконтактовую, центральную и верхнюю эндоконтактовую. Породы верхней эндоконтактовой зоны — метадолериты с микроофитовой и микродолеритовой структурой. Центральная часть интрузии сложена пикритами, первичными минералами которых являлись оливин, клинопироксен, ортопироксен и роговая обманка. Породы сильно изменены и практически полностью превращены в тальк-амфибол-серпентиновый агрегат. Магнезиальность оливина из этого горизонта, определенная по редким реликтам (см. рис. 2д, е), варьирует в пределах $\#Mg = 0.56–0.57$. Клинопироксен, так же как и оливин, в значительной степени изменен вторичными процессами. Его магнезиальность довольно стабильна и составляет $0.63–0.64$. Нижний горизонт представлен интенсивно измененными пикродолеритами. Из первичных минералов по псевдоморфозам и неизменным участкам в центральных частях обособлений устанавливаются клинопироксен и плагиоклаз. Вторичные минералы — амфибол, лейкоксен, хлорит, серпентин, альбит, карбонат, апатит, тальк и серицит. Датирование магматических пород Шатакского комплекса методом CA-TIMS (CA-ID-TIMS) по 4 зернам циркона из метабазальтов дало средне-взвешенную $^{207}Pb/^{206}Pb$ цифру 1381.5 ± 1.0 млн лет (MSWD = 1.0) и $^{206}Pb/^{238}U$ датировку 1380.3 ± 0.4 млн лет (MSWD = 1.1) [Пучков, 2010]. Дальнейшие исследования подтвердили возраст машакского комплекса в пределах 1380–1385 млн лет [Puchkov et al., 2013].

Кусинско-Копанский расслоенный комплекс с титан-железо-ванадиевым оруденением является одной из наиболее известных и относительно хорошо изученных ассоциаций интрузивных пород Башкирского мегантиклинория. В настоящее время Кусинско-Копанский комплекс рассматривается как типичная платформенная стратиформная интрузия, комагматичная ранне-среднерифейской риолит-базальтовой формации, или как представитель перидотит-пироксенит-норитовой формации расслоенных интрузий [Алексеев и др., 2000]. Тела комплекса приурочены к Юрюзано-Зюраткульскому разлому и имеют согласное залегание с вмещающими отложениями. Массивы комплекса имеют неоднородное внутреннее строение. Характерная их особенность — полосчатость, стратифицированность, заключающаяся в чередовании в разрезе «слоев» базитов переменной мощности (обычно первые десятки м), различного состава, зернистости, структуры и текстуры. Полосчатое строение массивов подчеркивается переменным содержа-

ем рудных минералов в породах и наличием согласных с общей полосчатостью пластов вкрапленных и сплошных титаномagnetитовых руд. Полосы базитов разного состава и рудные пласты хорошо прослеживаются по простирацию и падению, подчеркивая псевдостратифицированное, расслоенное строение массивов. Среднерифейский возраст комплекса определяется как геологическими, так и радиогеохронологическими данными. В последнее время многочисленными методами (Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb) был установлен единый возраст (1385–1395 млн лет) формирования пород (габброидов и гранитоидов) и массивных руд Кусинско-Копанского комплекса [Холоднов и др., 2012]. В 1991–1992 гг. при проведении съемочных работ сотрудниками Саткинской партии Челябинской ГРЭ пробурена скважина № 7 в 1.5–2 км к западу от Копанского массива в полосе развития известняков саткинской свиты (RF₁). Разрез, вскрытый скважиной, представлен следующими породами [Ковалев и др., 1995]: в интервале 0–38.3 м — известняки; 38.3–101.7 м — габброиды различного состава. Эндоконтактовые породы сложены оливинсодержащими амфиболизированными пироксенитами либо мелкозернистыми меланогаббро. Ниже зафиксирован горизонт такситовых габбро, который сменяется оливиновыми габбро (пикритами) с 10–20% оливина, причем сверху вниз по разрезу количество его заметно увеличивается. Оливин встречается в виде корродированных округлых или неправильной формы включений в клинопироксене либо в виде субидиоморфных кристаллов разных размеров (см. рис. 2ж, з). По составу оливины делятся на две группы со средней магнезиальностью ядер и краев: $\#Mg = 0.80–0.71$ и $\#Mg = 0.73–0.66$ соответственно. Клинопироксен представлен субидиоморфными изометричными зернами с размерами 1–3 мм в поперечнике, часто образующими гломерокристаллические агрегаты. Его зерна зональны, причем зональность может быть не только прямой (с уменьшением Mg# от ядер к краевым зонам), но и обратной. По характеру зональности выделяются минералы двух типов. К I типу отнесен клинопироксен с прямой зональностью, обладающий высокомагнезиальными ядрами (средняя Mg# 0.83, максимальная — 0.84) и более железистыми краевыми зонами (средняя Mg# 0.76, минимальная — 0.75). Клинопироксен II типа имеет железистые ядра (средняя Mg# 0.77), на которые нарастают зоны с высокой магнезиальностью (среднее 0.82, при колебаниях 0.83–0.82). Нами эти породы отождествляются с эндокон-

тактовой зоной и частью разреза нескрытых горизонтов Кусинско-Копанского массива, в структурном отношении являющейся апофизой массива [Ковалев и др., 1995].

Оценка P - T условий формирования расплавов

Для выяснения условий генерации расплавов, сформировавших пикритовые и пикродолеритовые комплексы, были выполнены расчеты температур формирования минеральных парагенезисов по оливин-клинопироксеновому ($Ol-Cpx$) геотермометру:

$$\ln K_{D}^{Ol/Aug}_{Fe/Mg} - 78.025 = \frac{-5945.96}{T} - 10.1327 \ln T$$

(при точности $\sigma T = \pm 6.1^\circ C$) [Loucks, 1996].

Путем подстановки в формулу

$$T_{Ca-Ol}(^\circ C) = \frac{10539 + 79.8P}{15.45 - \ln Ca^{Ol}} - 273,$$

предложенную в работе [De Hoog et al., 2010], температур, рассчитанных по $Ol-Cpx$ геотермометру, было определено давление, при котором сформировались минеральные ассоциации пикритовых и пикродолеритовых комплексов. Для проверки корректности полученных результатов были произведены расчеты температуры кристаллизации оливина по содержанию в нем кальция. Для анализа использовались только те данные, температуры которых, рассчитанные по $Ol-Cpx$ геотермометру и по содержанию кальция в оливине, различались не более чем на $5^\circ C$. В данной работе приводятся усредненные значения по составам оливина и клинопироксена (табл.).

Согласно полученным материалам, максимальные P - T условия установлены для средних составов центральных частей порфиroidных кристаллов оливина и центральных частей клинопироксена из окружения оливина Ишлинского комплекса ($T = 1197-1283^\circ C$, $P = 23-36$ кбар). Для аналогичных ассоциаций из пород «Курманайской дайки» P - T параметры варьируют в пределах $T = 1223^\circ C$, $P = 19$ кбар. В ассоциациях «краевые части кристаллов оливина – краевые части кристаллов клинопироксена» температуры снижаются до $1047-1075^\circ C$, давление до $12-15$ кбар для ишлинских пикритов и до $T = 1047^\circ C$, $P = 5$ кбар для пикритов «Курманайской дайки». При этом, как видно из рис. 3а, точки рассчитанных параметров образуют единый тренд, характеризующий процесс зарождения, эволюции и кристаллизации расплава

при формировании интрузивного тела. Сюда же (в «область магмогенерации») попадают и точки, рассчитанные по анализам «центральные части оливина – центральные части клинопироксена», заимствованные из работы А.А. Носовой с соавторами [2012] по пикритам Ишлинского тела (см. рис. 3а).

Принципиально иная картина характерна для минералов пикритов, входящих в состав Шатакской вулcano-плутонической ассоциации ($T = 1103^\circ C$, $P = 10$ кбар, для центральных частей кристаллов оливина и клинопироксена и $T = 1039-1097^\circ C$, $P = 1-5$ кбар — для краевых частей) и интрузивного расслоенного Кусинско-Копанского комплекса, представленного породами скв. № 7 ($T = 1045^\circ C$, $P = 9$ кбар, для центральных частей кристаллов оливина и клинопироксена и $T = 1016-1097^\circ C$, $P = 1-3$ кбар — для краевых частей) (см. табл.). При этом P - T параметры для пород скв. № 7 оказываются близки к полученным ранее данным В.В. Холоднова с соавторами для габброидов Копанского-Маткальского ($T = 900-1100^\circ C$; $P = 1-3$ кбар) и Кусинского-Медведевского массивов ($T = 600-900^\circ C$; $P = 5-7$ кбар) [Холоднов и др., 2012]. По нашему мнению, данные различия носят принципиальный характер и свидетельствуют о различных механизмах формирования однотипных пород при реализации плюмового процесса и обусловленного им рифтогенеза.

В обобщенном виде модель формирования магматических комплексов Башкирского мегантиклинория может быть представлена в следующем виде. Поступление недифференцированного мантийного вещества при подъеме плюма и начинающийся рифтогенный процесс активного типа приводят к внедрению расплава в верхние горизонты коры (рис. 4). Особенности структурно-тектонического строения надплюмовой литосферы, а также реологические и физико-механические характеристики слагающих ее комплексов являются во многом определяющими для формирования различных формационно-генетических типов магматических пород. В частности, в «среднерифейское время» на западном склоне Южного Урала и прилегающей части Восточно-Европейской платформы внедрение недифференцированного мантийного вещества привело к формированию дайково-пластовых тел, сформировавших малые дифференцированные и расслоенные интрузии, разнообразие которых было описано ранее [Алексеев и др., 2003], и крупных внутрикоровых магматических камер/очагов (см. рис. 4).

Таблица

Средние составы оливинов и клинопироксенов и расчетные P - T параметры для пикритовых и пикродолеритовых комплексов западного склона Южного Урала

Table

Average compositions of olivines and clinopyroxenes and calculated P - T parameters for picritic and picrodolerite complexes of the western slope of the Southern Urals

№ п/п	№ обр.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	T, °C	P, кбар
1	s_ish_2_ol (2)	40.21				15.90	0.28	42.75	0.27		1283	23
	s_ish_2_px (5)	49.64	1.50	4.16	0.11	10.22	0.10	14.98	18.59	0.60		
2	s_ish_3_ol (4)	39.74				19.75	0.03	39.75	0.08		1197	36
	s_ish_3_px (4)	52.21	0.22	4.15	0.53	7.03	0.14	17.7	17.43	0.11		
3	s_ish_4_ol (3)	39.70				18.45	0.10	41.03	0.15		1075	12
	s_ish_4_px (5)	53.21	0.03	3.14	0.57	6.83	0.11	21.67	14.09	0.32		
4	s_ish_7_ol (3)	37.66				27.71	0.19	34.24	0.10		1047	15
	s_ish_7_px (5)	50.75	1.11	2.91	0.04	9.91	0.09	15.88	18.58	0.50		
5	s_kurm_5_ol (2)	37.41				29.10	0.17	33.11	0.15		1059	10
	s_kurm_5_px (2)	50.80	1.13	3.38	0.02	9.55	0.11	15.68	18.35	0.66		
6	s_kurm_6_ol (4)	37.89				29.18	0.21	32.49	0.19		1047	5
	s_kurm_6_px (3)	50.85	1.02	2.84	0.06	9.38	0.05	15.82	19.33	0.56		
7	s_kurm_1_ol (4)	39.82				17.78	0.16	41.59	0.24		1223	19
	s_kurm_1_px (5)	50.93	0.60	4.07	0.47	9.16	0.08	19.51	14.07			
8	7_49_34_ol	38.00				23.32	0.41	37.61	0.15		1045	9
	7_49_43_px	52.36	0.56	2.32	0.74	6.55	0.00	16.56	20.73	0.44		
9	7_49_35_ol	38.04				24.54	0.45	37.43	0.18		1016	3
	7_49_44_px	52.78	0.74	1.85	0.82	5.79	0.00	17.43	20.46	0.34		
10	7_49_11_ol	37.25		0.19		26.36	0.25	35.33	0.32		1097	1
	7_49_07_px	50.81	1.07	3.02	0.00	8.54	0.00	15.30	20.07	0.39		
11	s_shat_1_ol (3)	37.44				27.29	0.37	34.81	0.20		1103	10
	s_shat_1_px (4)	51.24	1.19	3.06	0.00	9.02	0.40	15.76	18.67	0.48		
12	s_shat_2_ol (2)	37.58				26.03	0.28	35.18	0.18		1039	5
	s_shat_2_px (2)	51.26	0.94	2.64	0.25	8.97	0.21	15.58	19.68	0.75		
13	ish_18/1_ol	40.79			0.08	9.15		48.07	0.18		1333	35
	ish_18/1_px (27)	52.11	0.34	3.81	0.61	6.67	0.07	19.11	16.85	0.23		
14	ish_18/2_ol	40.97			0.09	9.26		49.88	0.17		1290	32
	ish_18/2_px (9)	52.34	0.19	3.16	1.02	5.92	0.12	18.52	18.49	0.28		

Примечание: № 1–4 — пикриты, Ишлинский комплекс; № 5–7 — пикриты «Курманайской дайки»; № 8–10 — породы скв. № 7; № 11, 12 — пикриты, Шатакский комплекс. № 13, 14 — пикриты, Ишлинский комплекс, по [Носова и др., 2012]. №№ 1, 2, 7, 8, 11, 13, 14 — центральные части кристаллов; №№ 3, 4, 5, 6, 9, 10, 12 — краевые части кристаллов. В скобках — количество определений.

Note: No. 1–4 — picrites, Ishlya complex; No. 5–7 — picrites of the Kurmanai Dyke; No. 8–10 — borehole rocks. No. 7; No. 11, 12 — picrites, the Shatak complex. No. 13, 14 — picrites, Ishlya complex, according to [Nosova et al., 2012]. No. 1, 2, 7, 8, 11, 13, 14 are the central parts of the crystals; No. 3, 4, 5, 6, 9, 10, 12 are the edge parts of the crystals. In parentheses is the number of definitions.

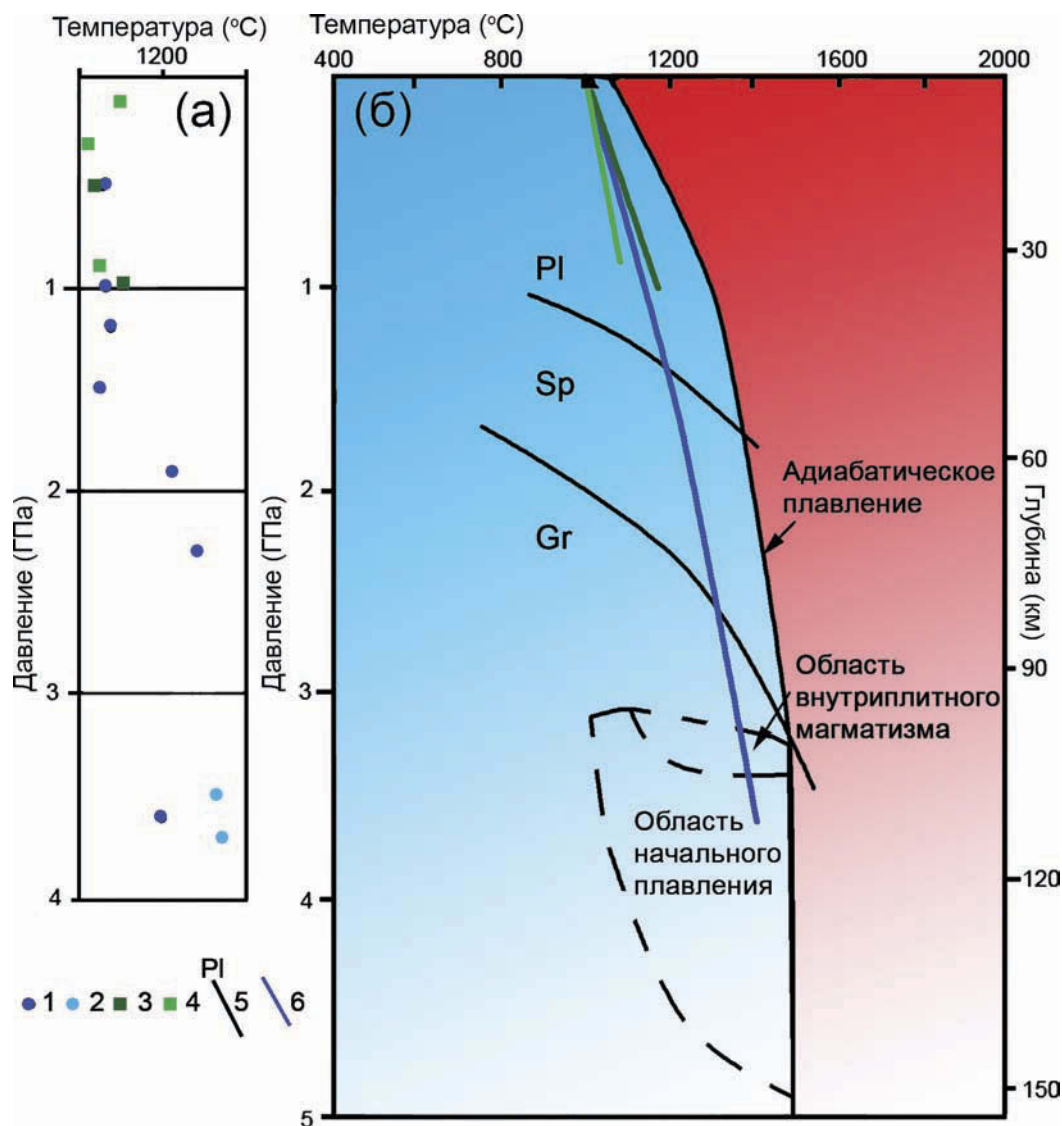


Рис. 3. *P-T*-диаграммы для расплавов, сформировавших пикриты западного склона Южного Урала. (а) — точки рассчитанных *P-T* параметров пород; (б) — тренды эволюции расплавов; (б) по [Green, 2005]

Условные обозначения: 1 — пикриты Ишлинского комплекса; 2 — пикриты Ишлинского комплекса по [Носова и др., 2012]; 3 — пикриты Шатакского комплекса; 4 — пикриты скв. № 7; 5 — поля устойчивости минеральных фаз: Pl — плагиоклаза, Sp — шпинели, Gr — граната; 6 — тренды эволюции расплавов.

Fig. 3. *P-T* diagrams for melts formed picrites of the western slope of the Southern Urals. (a) — points of calculated *P-T* rock parameters; (b) trends in the evolution of melts; (b) to [Green, 2005]

Legend: 1 — picrites of the Ishlya complex; 2 — picrites of the Ishlya complex according to [Nosova et al., 2012]; 3 — picrites of the Shatak complex; 4 — picrites of well No. 7; 5 — stability fields of mineral phases: Pl — plagioclase, Sp — spinel, Gr — garnet; 6 — trends in the evolution of melts.

Особенности эволюционного развития последних (флюидонасыщенность расплава, «открытость» или «закрытость» системы и т.п.) приводят к формированию либо вулкано-плутонических ассоциаций (Шатакский и Машакский комплексы), либо расслоенных интрузивных тел (Кусинско-Копанский комплекс). Образующиеся при

этом аналоги петротипов пород (пикритов и пикродолеритов, в частности) имеют принципиально иной генезис (результат действия кристаллизационно-гравитационного и/или ликвационного механизмов) и не могут быть отождествлены с пикритами и пикродолеритами 1 типа, сформировавшимися в результате кристаллизации

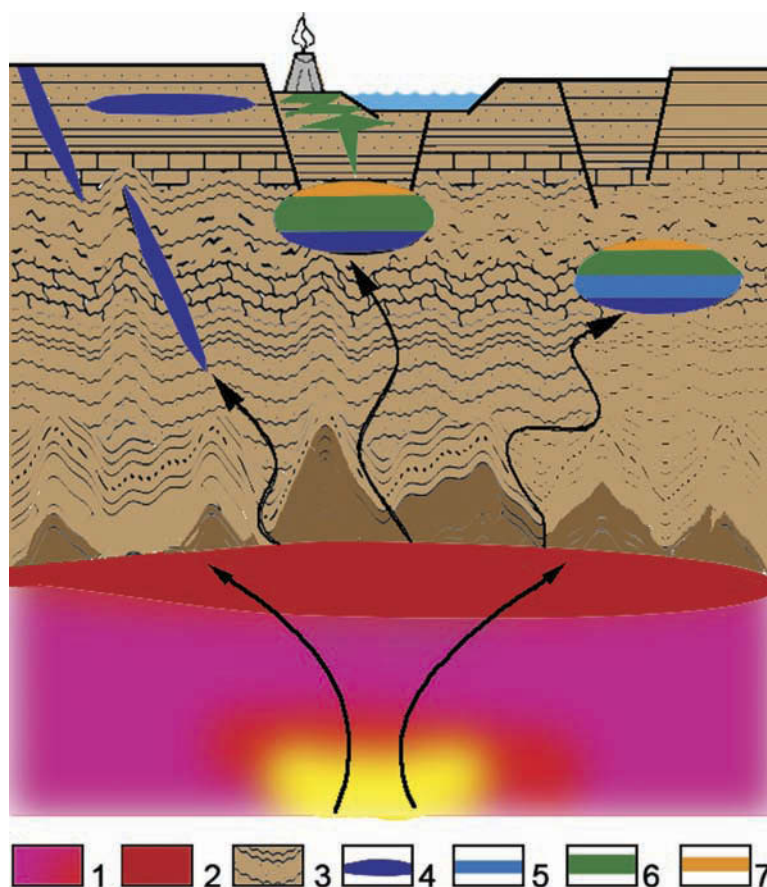


Рис. 4. Идеализированная схема формирования магматических пород различной формационной принадлежности

Условные обозначения: 1 — недифференцированный мантийный субстрат плюма; 2 — «линза» расплава в астеносфере; 3 — кора; 4 — породы пикритового и пикродолеритового состава; 5 — пироксениты; 6 — габбро, долериты; 7 — кислые породы (граниты, риолиты).

Fig. 4. Idealized scheme for the formation of magmatic images of different formational affiliation

Legend: 1 — undifferentiated mantle substrate of plume; 2 — “lens” of the melt in the asthenosphere; 3 — crust; 4 — rocks of picritic and picrodolerite composition; 5 — pyroxenites; 6 — gabbro, dolerites; 7 — acid rocks (granites, rhyolites).

недифференцированного мантийного расплава в верхних горизонтах коры. Базитовый магматизм, представленный в регионе отдельными телами, дайковыми роями, поясами, и имеющий близкий минеральный состав и однотипные геохимические характеристики на всей территории его проявления, также не может являться продуктом непосредственной кристаллизации недифференцированного мантийного расплава, а представляет собой дериваты крупной «магматической линзы», сформировавшейся, вероятнее всего, на границе «нижняя кора — астеносфера» по механизму, близкому к детально описанному А.В. Соболевым с соавторами [Соболев и др., 2009].

Таким образом, проведенные исследования показывают, что при реализации плюмового процесса возможно образование однотипных пород,

генезис которых принципиально различен. В обобщенном виде можно констатировать, что многостадийный процесс дифференциации расплава, контаминация вмещающих отложений и взаимодействие с породами рамы являются определяющими факторами для образования различных формационно-генетических типов магматических пород.

Работа выполнена в рамках Государственного задания (тема № 0252-2017-0012).

Список литературы:

Алексеев А.А., Алексеева Г.В., Ковалев С.Г. Расслоенные интрузии западного склона Урала. — Уфа: Гилем, 2000. — 188 с.

Алексеев А.А., Алексеева Г.В., Ковалев С.Г. Дифференцированные интрузии западного склона Урала. — Уфа: Гилем, 2003. — 171 с.

- Добрецов Н.Л., Борисенко А.С., Изох А.Э., Жмодик С.М.* Термохимическая модель пермотриасовых мантийных плюмов Евразии как основа для выявления закономерностей формирования и прогноза медно-никелевых, благородно- и редкометальных месторождений // Геология и геофизика. — 2010. — Т. 51, № 9. — С. 1159–1187. — Doi.org/10.1016/j.rgg.2010.08.002.
- Ковалев С.Г., Высоцкий И.В., Пучков В.Н., Маслов А.В., Гареев Э.З.* Геохимическая специализация структурно-вещественных комплексов Башкирского мегантиклинория. — Уфа: ДизайнПресс, 2013. — 268 с.
- Ковалев С.Г., Пучков В.Н., Высоцкий С.И., Ковалев С.С.* Условия образования магматических пород при плюмовом процессе (на примере западного склона Южного Урала) // Докл. РАН. — 2017. — Т. 475, № 2. — С. 171–175. — DOI: <https://doi.org/10.7868/s0869565217200129>.
- Ковалев С.Г., Сначев В.И., Романовская М.А.* Новые геолого-петрогенетические аспекты формирования Кусинско-Копанского комплекса // Вестник Московского Университета. — Сер. 4. Геология. — 1995. — № 4. — С. 81–85.
- Носова А.А., Каргин А.В., Ларионова Ю.О., Сазонова Л.В., Горожанин В.М., Ковалев С.Г.* Мезопротерозойская внутриплитная магматическая провинция Западного Урала: основные петрогенетические типы пород и их происхождение // Петрология. — 2012. — Т. 20, № 4. — С. 392–428.
- Пучков В.Н.* Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). — Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. — 280 с. ISBN: 978-5-94423-209-0.
- Пучков В.Н., Ковалев С.Г.* Плюмовые события на Урале и их связь с субглобальными эпохами рифтогенеза // Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы. — Иркутск: ИЗК СО РАН, 2013. — С. 34–38.
- Сазонова Л.В., Носова А.А., Ларионова Ю.О., Каргин А.В., Ковалев С.Г.* Мезопротерозойские пикриты восточной окраины Восточно-Европейской платформы и Башкирского мегантиклинория: петрогенезис и особенности составов оливина и клинопироксена // Литосфера. — 2011. — № 3. — С. 64–83.
- Соболев А.В., Криволицкая Н.А., Кузьмин Д.В.* Петрология родоначальных расплавов и мантийных источников магм сибирской трапповой провинции // Петрология. — 2009. — Т. 17, № 3. — С. 276–310. — <https://doi.org/10.1134/s0869591109030047>.
- Холоднов В.В., Бочарникова Т.Д., Шагалов Е.С.* Состав, возраст и генезис магнетит-ильменитовых руд средне-рифейского стратифицированного Медведевского массива (Кусинско-Копанский комплекс Южного Урала) // Литосфера. — 2012. — № 5. — С. 145–165.
- De Hoog Jan C.M., Louise G., Cornell D.H.* Trace-element geochemistry of mantle olivine and application to mantle petrogenesis and geothermobarometry // Chemical Geology. — 2010. — V. 270. — P. 196–215. — DOI: [10.1016/j.chemgeo.2009.11.017](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.11.017).
- Ernst R.E.* Large Igneous Provinces. — Cambridge University Press, 2014. — 653 p. — <https://doi.org/10.1017/CBO9781139025300>.
- Green D.H.* Primary magmas at mid-ocean ridges, 'hot-spots' and other intraplate settings: constraints on mantle potential temperatures // Geological Society of America. V. 388. 2005. — <https://doi.org/10.1130/0-8137-2388-4.217>.
- Kholodnov V.V., Bocharnikova T.D., Shagalov E.S.* Состав, возраст и генезис магнетит-ильменитовых руд среднерифейского стратифицированного Медведевского массива (Кусинско-Копанский комплекс Южного Урала) [Composition, age and genesis of magnetite-ilmenite ores of the Middle Riphean stratified Medvedev massif (Kusino-Kopan complex of the Southern Urals)] // Литосфера. 2012. No. 5. P. 145–165 (In Russian).
- Kovalev S.G., Puchkov V.N., Vysotskiy S.I., Kovalev S.S.* Usloviya obrazovaniya magmaticheskikh porod pri plyumovom protsesse (na primere zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala) // DAN. 2017. V. 475. No. 2. P. 171–175 (In Russian).
- Kovalev S.G., Snachev V.I., Romanovskaya M.A.* Novye geologo-petrogeneticheskie aspekty formirovaniya Kusinsko-Kopanskogo kompleksa [New geological and petrogenetic aspects of the formation of the Kusino-Copan complex] // Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser. 4. Geologiya. 1995. No. 4. P. 81–85 (In Russian).
- Kovalev S.G., Vysotskiy I.V., Puchkov V.N., Maslov A.V., Gareyev E.Z.* Geokhimicheskaya spetsializatsiya strukturno-temperatures // Geological Society of America. — V. 388. — 2005. — <https://doi.org/10.1130/0-8137-2388-4.217>.
- Loucks R.R.* A precise olivine-augite Mg-Fe-exchange geothermometer // Contrib Mineral Petrol. — 1996. — V. 125. — P. 140–150. — Doi.org/10.1007/s004100050211.
- Puchkov V.N., Bogdanova S.V., Ernst R., Kozlov V., Krasnobayev A.A., Soderlund U., Wingate M.T.D., Postnikov A.V., Sergeeva N.D.* The ca. 1380 Ma Mashak igneous event of the Southern Urals // Lithos. — 2013. — V. 174. — P. 109–124. — Doi.org/10.1016/j.lithos.2012.08.021.

Reference:

Alekseev A.A., Alekseeva G.V., Kovalev S.G. Rassloennye intruzii zapadnogo sklona Urala [Layered intrusions of the western slope of the Urals]. Ufa: Gilem, 2000. 188 p. (In Russian).

Alekseev A.A., Alekseeva G.V., Kovalev S.G. Differentsirovannye intruzii zapadnogo sklona Urala [Differentiated intrusions of the western slope of the Urals]. Ufa: Gilem, 2003. 171 p. (In Russian).

De Hoog Jan C.M., Louise G., Cornell D.H. Trace-element geochemistry of mantle olivine and application to mantle petrogenesis and geothermobarometry // Chemical Geology. 2010. V. 270. P. 196–215. DOI: [10.1016/j.chemgeo.2009.11.017](https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.11.017).

Dobretsov N.L., Borisenko A.S., Izokh A.E., Zhmodik S.M. Termohimicheskaya model' permotriasyovnykh mantiynnykh plyumov Evrazii kak osnova dlya vyyavleniya zakonornosti formirovaniya i prognoza medno-nikelevykh, blagorodno- i redkometal'nykh mestorozhdenii [A thermochemical model of Eurasian Permo-Triassic mantle plumes as a basis for prediction and exploration for Cu-Ni-PGE and rare-metal ore deposits] // Geologiya i geofizika. 2010. V. 51, No. 9. P. 1159–1187. Doi.org/10.1016/j.rgg.2010.08.002. (In Russian).

Ernst R.E. Large Igneous Provinces. Cambridge Univ. Press, 2014. 653 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139025300>.

Green D.H. Primary magmas at mid-ocean ridges, 'hot-spots' and other intraplate settings: constraints on mantle potential temperatures // Geological Society of America. V. 388. 2005. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2388-4.217>.

Kholodnov V.V., Bocharnikova T.D., Shagalov E.S. Sostav, vozrast i genезis magnetit-il'menitovykh rud srednerifejskogo stratifitsirovannogo Medvedevskogo massiva (Kusinsko-Kopanskij kompleks YUzhnogo Urala) [Composition, age and genesis of magnetite-ilmenite ores of the Middle Riphean stratified Medvedev massif (Kusino-Kopan complex of the Southern Urals)] // Litosfera. 2012. No. 5. P. 145–165 (In Russian).

Kovalev S.G., Puchkov V.N., Vysotskiy S.I., Kovalev S.S. Usloviya obrazovaniya magmaticheskikh porod pri plyumovom protsesse (na primere zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala) // DAN. 2017. V. 475. No. 2. P. 171–175 (In Russian).

Kovalev S.G., Snachev V.I., Romanovskaya M.A. Novye geologo-petrogeneticheskie aspekty formirovaniya Kusinsko-Kopanskogo kompleksa [New geological and petrogenetic aspects of the formation of the Kusino-Copan complex] // Vestnik Moskovskogo Universiteta. Ser. 4. Geologiya. 1995. No. 4. P. 81–85 (In Russian).

Kovalev S.G., Vysotskiy I.V., Puchkov V.N., Maslov A.V., Gareyev E.Z. Geokhimicheskaya spetsializatsiya strukturno-

veshchestvennykh kompleksov Bashkirskogo megantiklinoriya [Geochemical specialization of structurally-material complexes of the Bashkir meganticlinorium]. Ufa: DizaynPress, 2013. 268 p. (In Russian).

Loucks R.R. A precise olivine-augite Mg-Fe-exchange geothermometer // *Contrib Mineral Petrol.* 1996. V. 125. P. 140–150. Doi.org/10.1007/s004100050211.

Nosova A.A., Kargin A.V., Larionova Y.O., Sazonova L.V., Gorozhanin V.M., Kovalev S.G. Mesoproterozoic within-plate igneous province of the western urals: Main petrogenetic rock types and their origin // *Petrology.* 2012. V. 20. No. 4. P. 356–390. Doi.org/10.1134/s086959111204008x.

Puchkov V.N. Geologiya Urala i Priural'ya (aktual'nye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii) [Geology of the Urals and the Urals (actual issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny)] Ufa: DizajnPoligrafServis, 2010. 280 p. (In Russian).

Puchkov V.N., Bogdanova S.V., Ernst R., Kozlov V., Krasnobaev A.A., Soderlund U., Wingate M.T.D., Postnikov A.V., Serge-

eva N.D. The ca. 1380 Ma Mashak igneous event of the Southern Urals // *Lithos.* 2013. V. 174. P. 109–124. Doi.org/10.1016/j.lithos.2012.08.021.

Puchkov V.N., Kovalev S.G. Plyumovye sobytiya na Urale i ikh svyaz' s subglobal'nymi ehpokhami riftogeneza [Plume events in the Urals and their relationship to the subglobal epochs of rifting] // *Kontinental'nyj riftogenez, sopushtvuyushhie protsessy.* Irkutsk: IZK SO RAN, 2013. P. 34–38 (In Russian).

Sazonova L.V., Nosova A.A., Larionova Yu.O., Kargin A.V., Kovalev S.G. Mezoproterozojskie pikrity vostochnoj okrainy Vostochno-Evropejskoj platformy i Bashkirskogo megantiklinoriya: petrogenezis i osobennosti sostavov olivina i klinopiroksena [Mesoproterozoic picrites of the eastern margin of the East European platform and the Bashkir meganticlinorium: petrogenesis and features of the compositions of olivine and clinopyroxene] // *Litosfera.* 2011. No. 3. P. 64–83 (In Russian).

Sobolev A.V., Krivolutskaya N.A., Kuzmin D.V. Petrology of the parental melts and mantle sources of Siberian trap magmatism // *Petrology.* 2009. V. 17, No. 3. P. 253–286. https://doi.org/10.1134/s0869591109030047.

Сведения об авторах:

Ковалев Сергей Григорьевич, доктор геол.-мин. наук, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа. E-mail: kovalev@ufaras.ru

Высоцкий Сергей Игоревич, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа

Ковалев Сергей Сергеевич, Институт геологии — обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (ИГ УФИЦ РАН), г. Уфа

About the author:

Kovalev Sergei Grigor'evich, doctor of geological and mineralogical sciences, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa. E-mail: kovalev@ufaras.ru

Vysotsky Sergei Igorevich, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa

Kovalev Sergei Sergeevich, Institute of Geology — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (IG UFRC RAS), Ufa