

## ГЕОХИМИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОРОДАХ ШАТАКСКОГО КОМПЛЕКСА (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© 2019 г. С. И. Высоцкий, С. Г. Ковалев

**Реферат.** В статье приводятся материалы по геохимии редкоземельных элементов, платиноидов и золота в вулканогенно-осадочных отложениях Шатакского комплекса.

В результате проведенных исследований установлено, что пикриты комплекса характеризуются пониженными содержаниями крупноионных (Rb, Ba, K) и высокозарядных (Th, U) элементов, а базальты Кузьелгинской и каранской подсуит по целому ряду параметров различаются между собой. Анализ индикаторных отношений ( $Nb/Y - Zr/Y$ ,  $Nb/Y - Zr/Y$ ,  $Lu/Hf - La/Sm$ ) показал, что расплав, сформировавший магматические породы комплекса, имеет плюмовый источник. Обогащенность магматических пород Au, Pd и Rh — элементами, характерными для основного магматизма, — свидетельствует о том, что все разнообразие магматических пород Шатакского комплекса и вариации в них содержания благородных металлов обусловлены внутрикамерной дифференциацией расплава и последующим метаморфизмом пород.

Установлено, что геохимические отношения РЗЭ, платиноидов и золота шатакских конгломератов превышают аналогичные параметры в континентальной коре. Делается вывод о том, что повышенные содержания платиноидов и золота в осадочных породах комплекса обусловлены прямым воздействием на них вулканоплутонического магматизма с последующим перераспределением вещества при метаморфизме.

**Ключевые слова:** Шатакский комплекс, редкоземельные элементы, платиноиды, золото, пикриты, базальты, риолиты, конгломераты

## GEOCHEMISTRY OF RARE-EARTH ELEMENTS AND NOBLE METALS IN ROCK OF THE SHATAK COMPLEX (SOUTH URALS)

S. I. Vysotsky, S. G. Kovalev

**Abstract.** The article presents materials on the geochemistry of rare-earth elements, platinoids and gold in volcanogenic-sedimentary sediments of the Shatak complex.

As a result of the research, it was established that the picrites of the complex are characterized by low contents of large-ion (Rb, Ba, K) and high-charge (Th, U) elements, and the basalts of the Kuzelga and Karan subformation differ in their parameters. Analysis of the indicator ratios ( $Nb/Y - Zr/Y$ ,  $Nb/Y - Zr/Y$ ,  $Lu/Hf - La/Sm$ ) showed that the melt that formed the igneous rocks of the complex has a plume source. The enrichment of igneous rocks of Au, Pd and Rh — with elements characteristic of the main magmatism suggests that the whole diversity of igneous rocks of the Shatak complex and variations in their precious metal contents are due to the intracameral differentiation of the melt and the subsequent metamorphism of the rocks.

It has been established that for most of the important geochemical relations of rare-earth elements, as well as the amounts of platinoids and gold, the average values of the Shatak conglomerates substantially exceed their content in the continental crust. It is concluded that the elevated contents of platinoids and gold in the sedimentary rocks of the complex are due to the direct influence of volcanic-plutonic magmatism on them, followed by redistribution of the substance during metamorphism.

**Keywords:** Shatak complex, rare-earth elements, platinoids, gold, picrites, basalts, rhyolites, conglomerates

**Для цитирования:** Высоцкий С.И., Ковалев С.Г. Геохимия редкоземельных элементов и благородных металлов в породах Шатакского комплекса (Южный Урал) // Геологический вестник. 2019. № 2. С. 58–71. DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-2-5>.

**For citation:** Vysotsky S.I., Kovalev S.G. Geochemistry of rare-earth elements and noble metals in rock of the Shatak complex (South Urals) // Geologicheskii vestnik. 2019. No.2. P. 58–71. DOI: <http://doi.org/10.31084/2619-0087/2019-2-5>.

## Введение

В пределах Башкирского мегантиклинория основание среднерифейских отложений представлено машакской свитой, впервые выделенной А.И. Ивановым [1937] со стратотипом на хр. Машак. Возрастным аналогом машакской свиты являются вулканогенно-осадочные образования хр. Бол. и Мал. Шатак, объединенные К.А. Львовым [1936] в шатакскую свиту. Позднее вулканогенно-осадочные образования машакской (шатакской) свиты были изучены А.Ф. Ротарем с соавторами [Ротарь и др., 1982; Парначев и др., 1986] и расчленены на подсвиты (снизу вверх): кузьелгинскую, казавдинскую, быковскую, калпакскую, куянтавскую, каранскую, шакитарскую и ямантаускую [Парначев и др., 1986], что отражено в Стратиграфических схемах докембрия Урала [1993]. Описываемые образования расположены на восточном крыле Ямантауского антиклинория, слагаая моноклиналь, осложненную дизъюнктивными нарушениями и мелкой складчатостью, где они перекрывают юшинскую свиту нижнего рифея, сменяясь зигальгинскими кварцевыми песчаниками и кварцитопесчаниками (рис. 1). На хр. Бол. Шатак машакская свита представлена осадочными (конгломераты, полимиктовые песчаники, алевролиты и углеродисто-глинистые сланцы), магматическими (пикриты, метабазалты, риолиты) и вулканогенно-осадочными (туфы и туфобрекчии) образованиями.

Пикриты образуют пластовую интрузию, расположенную в основании машакской свиты на ее непосредственной границе с подстилающими отложениями юшинской свиты [Ковалев, Высоцкий, 2006, 2008]. Макроскопически породы представлены зеленовато-серыми, темно-зелеными среднезернистыми амфиболлизированными разновидностями, имеющими массивную текстуру и видимую мощность около 25–30 м. Детальное изучение позволило выделить в строении интрузии три зоны: нижнюю эндоконтактовую, центральную и верхнюю эндоконтактовую. Породы верхней эндоконтактовой зоны представлены метадолеритами 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. Нижний горизонт представлен интенсивно измененными

пикродолеритами. Из первичных минералов по псевдоморфозам устанавливаются клинопироксен и плагиоклаз. Вторичные минералы представлены амфиболом, лейкоксеном, хлоритом, серпентином, альбитом, карбонатом, апатитом, тальком и серицитом.

Метабазалты Шатакского комплекса, максимальное количество которых входит в состав кузьелгинской и каранской подсвит, представляют собой зеленые, зеленовато-серые средне-мелкозернистые породы, для которых характерны микродолеритовая, микроофитовая, апоинтерсерральная и порфириформная структуры. Минеральный состав пород включает в себя клинопироксен, плагиоклаз, роговую обманку, титаномагнетит и магнетит. Ассоциация вторичных минералов представлена амфиболом актинолит-тремолитового ряда, хлоритом (пеннин-клинохлор), эпидотом, серицитом, титанитом, лейкоксеном и гематитом. В крупных телах наблюдается отчетливое увеличение размерности кристаллов в направлении от контактов внутрь тел, при этом минеральный состав не претерпевает каких-либо изменений, изменяются лишь размерность кристаллов и микроструктурные особенности пород: в эндоконтактах структура близка к интерсерральной с удлиненными лейстами плагиоклаза и интерстициальным пространством, заполненным стекловатым мезостагисом либо продуктами его девитрификации; в центральных частях тел породам присущи микрогаббровая, микродолеритовая и микроофитовая структуры. Часто в прикровельных и приподожвенных частях магматических тел наблюдаются обильные миндалины, выполненные кальцит-кварц-эпидот-хлоритовым агрегатом, что свидетельствует о значительной флюидонасыщенности внедрявшейся магмы.

Риолиты — светло-серые породы с порфириформно-флюидальной и шлирово-такситовой структурой. Основная масса сложена мелкозернистым кварц-полевошпатовым агрегатом. В порфириформных выделениях присутствует кислый плагиоклаз (андезин-олигоклаз). Темноцветные минералы представлены зеленовато-бурым биотитом и хлоритом. В качестве аксессуаров встречаются апатит, ортит, монацит, титанит, эпидот.

Кроме того, в пределах комплекса встречаются интрузивные габбро, габбро-долериты, представленные силлами или штокообразными телами с рвущими контактами. Практически все магматические породы претерпели интенсивный зеленокаменный метаморфизм. Они окварцованы и серицитизированы.

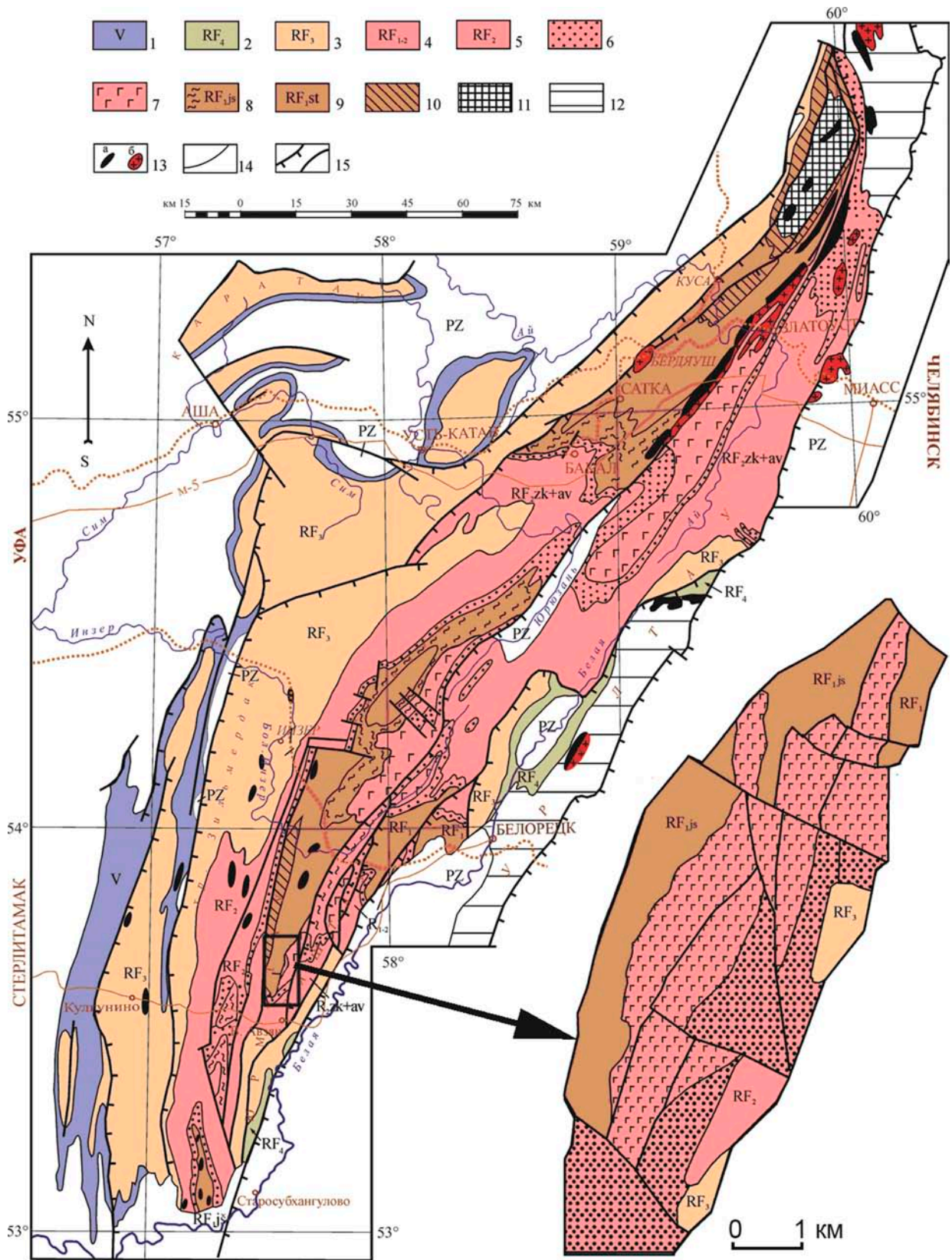


Рис. 1. Геологическая схема Башкирского мегантиклинория и Шатакского комплекса

Fig. 1. Geological scheme of the Bashkir meganticlinorium and the Shatak complex



*Условные обозначения к рис. 1:* PZ — нерасчлененные отложения палеозоя; 1 — венд; 2 — завершающий рифей (аршиний); 3 — верхний рифей; 4 — нижний и средний рифей Маярдакского антиклинория; 5 — нерасчлененные отложения зигазино-комаровской и авзынской свит; 6 — зигалгинская свита (RF<sub>2</sub>); 7 — машакская свита (RF<sub>2</sub>); 8 — бакальская и юшинская свиты; 9 — саткинская и суранская свиты; 10 — айская и большеинзерская свиты; 11 — метаморфические образования архея — раннего протерозоя тараташского комплекса; 12 — метаморфические образования Уфалейско-Уралтауского мегантиклинория; 13 — габбро-долериты (а), граниты (б); 14 — геологические границы; 15 — основные разрывные нарушения.

*Legend to fig. 1:* PZ — undivided Paleozoic deposits; 1 — Vendian; 2 — the Terminal Riphean (Arshinian); 3 — Upper Riphean; 4 — Lower and Middle Riphean of the Mayardak anticlinorium; 5 — undivided sediments of the Zigaza-Komarovo and Avzyan Formations; 6 — the Zigalga Formation (RF<sub>2</sub>); 7 — Mashak Formation (RF<sub>2</sub>); 8 — the Bakal and Yusha Formations; 9 — Satka and Suran Formations; 10 — the Ai and Bolsheinzher Formations; 11 — metamorphic formations of the Archean — Early Proterozoic of the Taratash complex; 12 — metamorphic formations of the Ufaley-Uraltau meganticlinorium; 13 — gabbro-dolerites (a), granites (b); 14 — geological boundaries; 15 — the main thrusts and normal faults.

Осадочные породы машакской свиты слагают около 75% ее объема и представлены преимущественно грубозернистыми разностями: конгломератами и песчаниками. Алевролиты, алевропелитовые сланцы и известняки распространены в подчиненных количествах. Конгломераты свиты развиты на нескольких стратиграфических уровнях. Они на 70–80% сложены хорошо окатанными обломками кварцитопесчаников и кварцитов, реже железистых кварцитопесчаников, микрокварцитов и разнообразных сланцев. В базальных горизонтах повсеместно отмечаются галька и глыбы подстилающих пород юшинской свиты (RF<sub>1</sub>). Цемент сложен кварцевым песчаным материалом и мелкочешуйчатой серицит-хлоритовой массой. Песчаники представлены полимиктовыми и кварцевыми разностями, последние на 80–90% состоят из обломков кварца с хлорит-серицитовым цементом. Алевролиты и алевропелитовые сланцы встречаются в тонком переслаивании друг с другом, реже слагают самостоятельные маломощные горизонты и пачки.

Датирование магматических пород Шатакского комплекса по единичным кристаллам цирконов на SHRIMP-II (ВСЕГЕИ) показало присутствие в пробах нескольких популяций с возрастом от 1500–1550 до 1330–1350 млн лет [Пучков и др., 2007; Краснобаев и др., 2008, 2013]. Возраст, полученный методом СА-TIMS (СА-ID-TIMS) по 4 зернам циркона из метабазальтов, дал средневзвешенную <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb датировку 1381.5±1.0 млн лет (MSWD = 1.0) и <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U датировку 1380.3±0.4 млн лет (MSWD = 1.1) [Пучков, 2010].

### Методы исследования

Концентрации редких и рассеянных элементов (Li, Be, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, PЗЭ, Hf, Ta, W, Tl, Pb, Bi, Th, U) определены методом ICP-MS в ЦИИ ВСЕГЕИ (г. Санкт-Пе-

тербург). Содержания благородных элементов (Pt, Pd, Rh, Ru, Ir, Au) определены тем же методом в ЦИИ ВСЕГЕИ. Пределы обнаружения последних составляют 0.002 г/т.

### Геохимическая характеристика

Геохимические характеристики магматических пород комплекса обладают определенной спецификой. В частности, по величинам нормализованных отношений La<sub>n</sub>/Lu<sub>n</sub> и Ce<sub>n</sub>/Yb<sub>n</sub> все разновидности пород (пикриты — 2.54–4.38 и 2.29–4.07; базальты кузьелгинской подсвиты — 3.56–6.21 и 3.04–4.83; базальты каранской подсвиты — 0.91–4.42 и 0.48–3.58; риолиты — 3.56–112.73 и 2.11–67.25 соответственно) в различной степени обогащены легкой группой PЗЭ (рис. 2).

При этом сами легкие лантаноиды значительно фракционированы, La<sub>n</sub>/Sm<sub>n</sub> отношение в пикритах составляет 1.61–3.11, в базальтах кузьелгинской подсвиты — 1.73–2.89, каранской подсвиты — 0.6–2.29, в риолитах — 2.71–4.7.

Сравнительный анализ пикритов Шатакского комплекса с аналогичными породами, распространенными в пределах Башкирского мегантиклинория [Ковалев, 1996, 2011], показывает, что для первых характерны пониженные содержания крупноионных (Rb, Ba, K) и высокочargedных (Th, U) элементов, четко проявленные европиевый и стронциевый минимумы (см. рис. 2), меньшее количество PЗЭ (среднее по пикритам Шатака — 60.5, среднее по пикритам Башкирского мегантиклинория — 97.4) и меньшая степень их дифференцированности (La/Lu<sub>n</sub> — пикриты Шатака — 4.36, пикриты Башкирского мегантиклинория — 8.85; Ce/Yb<sub>n</sub> — пикриты Шатака — 3.44, пикриты Башкирского мегантиклинория — 7.3).

Базальты Шатакского комплекса по целому ряду параметров различаются между собой (см. рис. 2). Сравнительный анализ основных пород из кузьелгинской и каранской подсвит показывает,

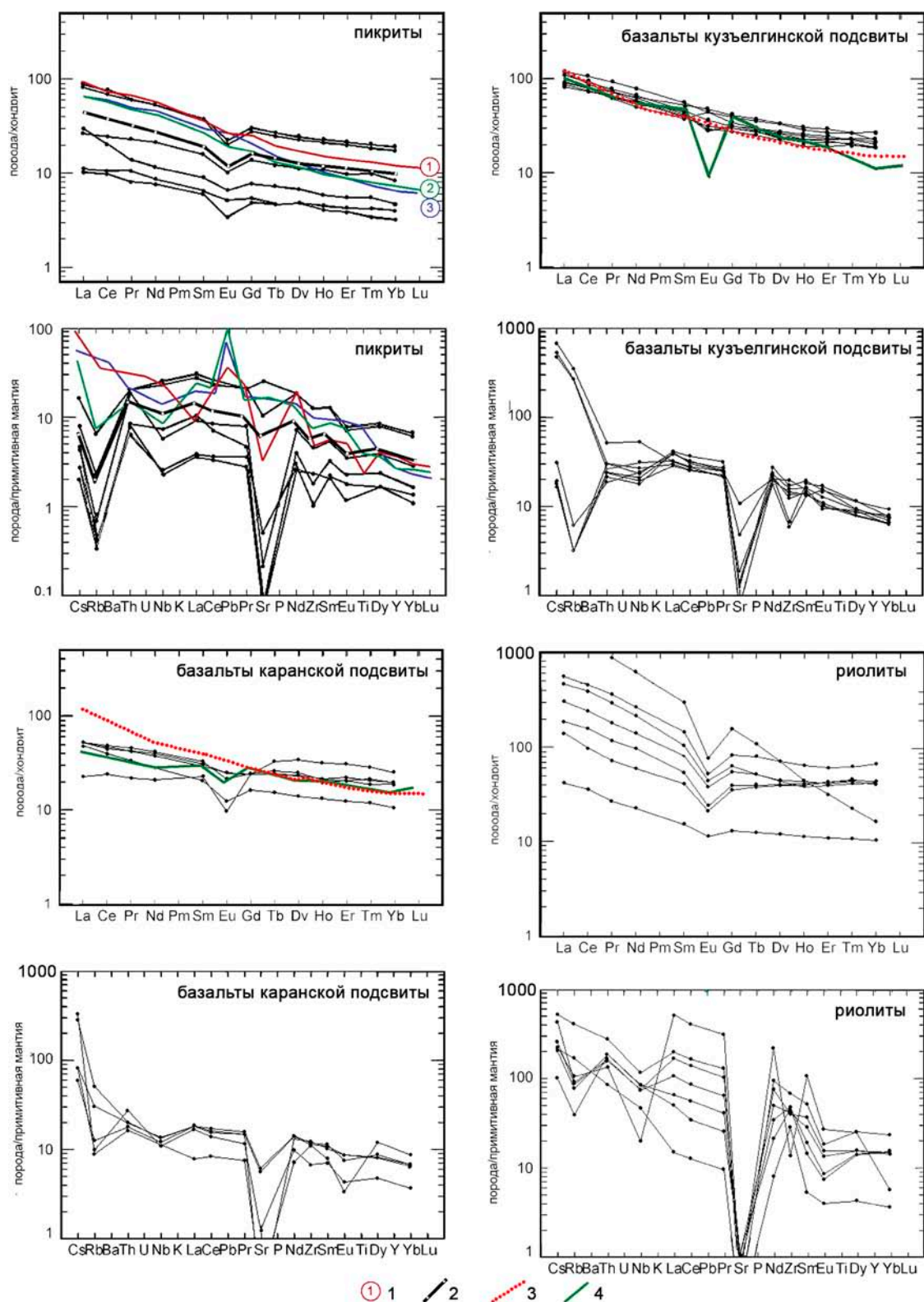


Рис. 2. Графики нормализованных содержаний РЗЭ и спайдер-диаграммы для магматических пород Шатакского комплекса. По [Ковалев и др., 2018]

Fig. 2. Graphs of normalized REE contents and spider diagrams for igneous rocks of the Shatak complex. By [Kovalev et al., 2018]

*Условные обозначения к рис. 2:* 1 — пикритовые комплексы Башкирского мегантиклинория (1 — Шуйдинский комплекс, 2 — Лапыштинский комплекс, 3 — Мисаелгинский комплекс) по [Ковалев, 2011]; 2 — средний состав пикритов Шатакского комплекса; 3 — внутриплитные базальты (субщелочные оливиновые базальты, вулканический центр Бойна, Эфиопия по [Barberi et al., 1975]); 4 — базальты машакской свиты по [Савельев и др., 2009]. Хондрит и примитивная мантия по [McDonough, Sun, 1995].

*Legend to fig. 2:* 1 — picritic complexes of the Bashkirian meganticlinorium (1 — Shuydinsky complex, 2 — Lapyshhta complex, 3 — Misaelga complex) by [Kovalev, 2011]; 2 — average composition of picrites of the Shatak complex; 3 — intraplate basalts (subalkaline olivine basalts, Boyne volcanic center by [Barberi et al., 1975]); 4 — basalts of the Mashak Formation [Saveliev et al., 2009]. Chondrite and primitive mantle after [McDonough, Sun, 1995].

что первые содержат почти в 2 раза большее количество РЗЭ (146.79 г/т — базальты кузьелгинской подсвиты, 70.29 г/т — базальты каранской подсвиты), для них характерна большая дифференцированность РЗЭ ( $La_n/Lu_n$  — 39.61 и 13.56 соответственно,  $Ce_n/Yb_n$  — 30.62 и 11.69 соответственно). Дифференцированность легкой и тяжелой групп редкоземельных элементов в кузьелгинских базальтах также значительно выше, чем в каранских ( $La_n/Sm_n$  — 17.94 и 8.77 соответственно,  $Sm_n/Yb_n$  — 16.38 и 8.23 соответственно). На графиках нормализованных содержаний РЗЭ (см. рис. 2) видно, что аналогичные тенденции характерны и для базальтов машакской свиты хр. Машак, из чего следует, что эти различия имеют генетическую природу. Сравнение обеих разновидностей с субщелочными оливиновыми базальтами вулканического центра Бойна (Эфиопия), как с представителями типичных рифтогенных образований, показывает, что базальты кузьелгинской подсвиты как хр. Бол. Шатак так и хр. Машак практически полностью им идентичны, в то время как базальты каранской подсвиты указанных разрезов характеризуются меньшим количеством легкой группы РЗЭ, меньшей дифференцированностью элементов и четко проявленным европиевым минимумом.

Определенная специфика в распределении редкоземельных элементов характерна и для риолитов (см. рис. 2). Им присущи высокие содержания РЗЭ (среднее — 533.75 г/т, при разбросе значений от 60.81 г/т до 1605.75 г/т), значительная дифференцированность ( $La_n/Lu_n$  — 22.14,  $Ce_n/Yb_n$  — 13.85) при относительно слабо проявленной дифференцированности в группе легких ( $La_n/Sm_n$  — 3.72) и тяжелых ( $Sm_n/Yb_n$  — 4.02) РЗЭ. Так же, как и для пикритов и базальтов, для риолитов характерны четко проявленные европиевый и стронциевый минимумы.

На диаграмме Th/Yb — Ta/Yb (рис. 3) фигуративные точки составов магматических пород Шатакского комплекса располагаются вдоль главной последовательности между точками, характеризующими примитивную мантию и внутриплитные базальты, а наклон тренда эволюции состава магм

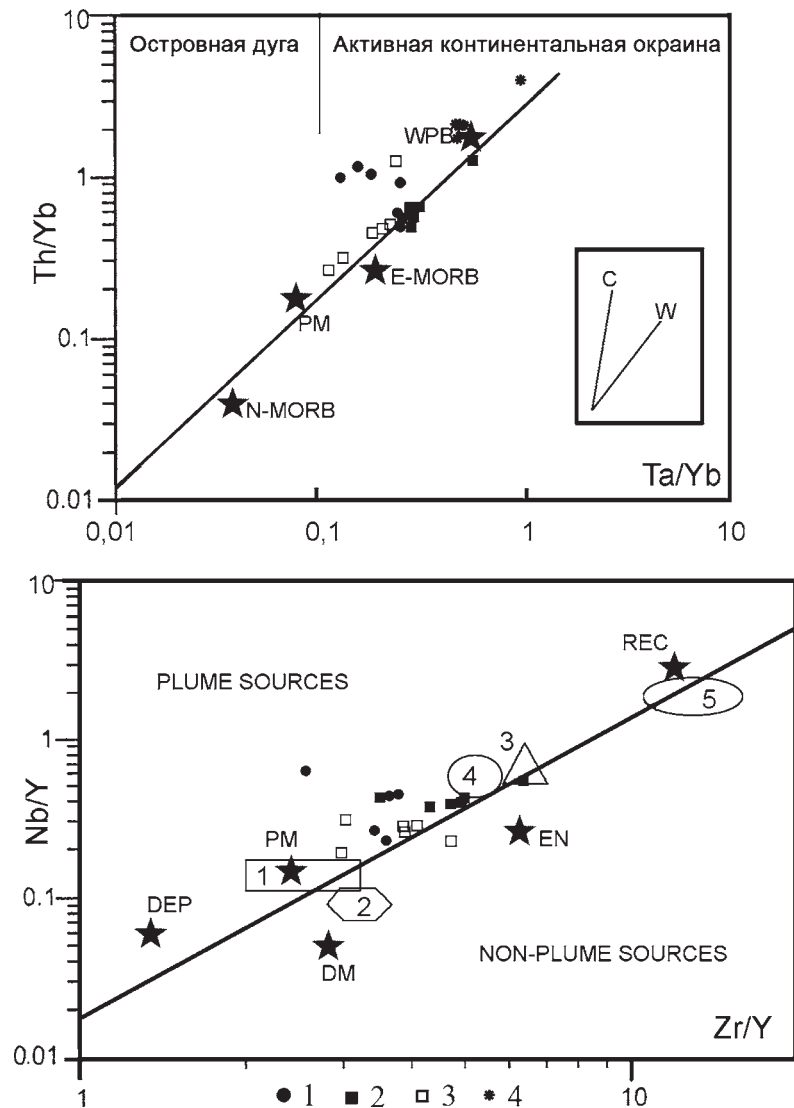
по [Chaplygin et al., 2007] свидетельствует о том, что они образовались в процессе внутриплитного (мантийного) обогащения литофильными элементами. При этом точки составов пикритов и риолитов располагаются вне общего тренда базальтоидов, что может свидетельствовать об их формировании в результате дифференциации расплава в промежуточной камере.

На диаграмме Nb/Y — Zr/Y (см. рис. 3) магматические породы Шатакского комплекса, так же как и на предыдущей диаграмме, располагаются вдоль главной последовательности между точками, характеризующими примитивную мантию и титанистые пикриты и пикробазальты Печенги и Карелии, группируясь в поле плюмового источника магматизма.

На диаграмме Lu/Hf — La/Sm (рис. 4) точки составов магматических пород Шатакского комплекса группируются вокруг тренда плавления шпинелевого перидотита, а среднее значение, рассчитанное для пикритов и базальтов кузьелгинской и каранской подсвит, располагается непосредственно на самом тренде. Примечательным является то, что точки характеризующие пикриты Мисаелгинского и Лысогорского комплексов, представляющие собой мантийный расплав, раскристаллизовавшийся в коровых условиях [Ковалев, 2011], группируются на тренде плавления гранатового перидотита, а пикриты Лапыштинского комплекса, относимые к среднему рифею [Алексеев, 1984; Ковалев, 1996], «тяготеют» к шатакским магматическим породам.

Таким образом, приведенный анализ свидетельствует о том, что магматические породы Шатакского комплекса являются продуктом эволюционного развития (дифференциации) расплава в промежуточном очаге.

Геохимическая специализация терригенных пород машакской свиты во многом определяется их ассоциацией с магматическими породами Шатакского комплекса, условиями осадконакопления при формировании и развитии рифтогенной структуры и последующим динамотермальным метаморфизмом [Высоцкий, Ковалев, 2019]. Как



**Рис. 3.** Положение точек составов магматических пород Шатакского комплекса на диаграммах Th/Yb – Ta/Yb и Nb/Y – Zr/Y

Условные обозначения: 1 — пикриты; 2 — базальты кузьелгинской подсвиты; 3 — базальты каранской подсвиты; 4 — риолиты. Тренды эволюции составов магм, по [Chaplygin et al., 2007]: W — в процессе внутриплитного (мантийного) обогащения литофильными элементами; C — контаминации континентальной коры. Поля и точки составов пород эталонных обстановок для диаграммы Th/Yb – Ta/Yb: WPB — внутриплитные базальты (субщелочные оливиновые базальты, вулканический центр Бойна, Эфиопия по [Barberi et al., 1975]); PM — примитивная мантия по [Taylor, McLennan, 1985]; E-MORB и N-MORB — составы «обогащенных» и «нормальных» базальтов срединно-океанических хребтов по [Sun, McDonough, 1989]; для диаграммы Nb/Y – Zr/Y: DM — деплетированная мантия; PM — примитивная мантия; EN, REC — мантийные составы, обогащенные коровым веществом. Поля: 1 — низкотитанистые пикриты (коматииты) древних зеленокаменных поясов, 2 — низкотитанистые пикриты фанерозойских складчатых областей, 3 — титанистые пикриты и пикробазальты Печенги, 4 — то же района Ангозеро (Карелия), 5 — высокотитанистые пикриты (меймечиты) Гулинского комплекса (Сибирь).

**Fig. 3.** Position of the points of the composition of igneous rocks of the Shatak complex on the Th/Yb – Ta/Yb and Nb/Y – Zr/Y diagrams

Legend: 1 — picrites; 2 — basalts of Kuzyelga subsuite; 3 — basalts of the Karan subsuite; 4 — Rhyolite. Trends in the evolution of magma compositions according to [Chaplygin et al., 2007]: W — in the process of intraplate (mantle) enrichment with lithophilic elements; C — contamination of the continental crust. Fields and rock composition points of reference environments for the Th/Yb – Ta/Yb: WPB — intraplate basalts (subalkaline olivine basalts, Boyna volcanic center, Ethiopia according to [Barberi et al., 1975]); PM — primitive mantle according to [Taylor, McLennan, 1985]; E-MORB and N-MORB — compositions of “enriched” and “normal” basalts of midocean ridges according to [Sun, McDonough, 1989]; for Nb/Y – Zr/Y diagram: DM — depleted mantle; PM — primitive mantle; EN, REC — mantle compositions enriched in crust. Fields: 1 — low titanium picrites (komatiites) of ancient greenstone belts, 2 — low titanium picrites of the Phanerozoic folded regions, 3 — titanium picrites and picrobasalts of Pechenga, 4 — the same for the area of Angozero (Karelia), 5 — high titanium picrites (meimechites) of the Gulinsky complex (Siberia).



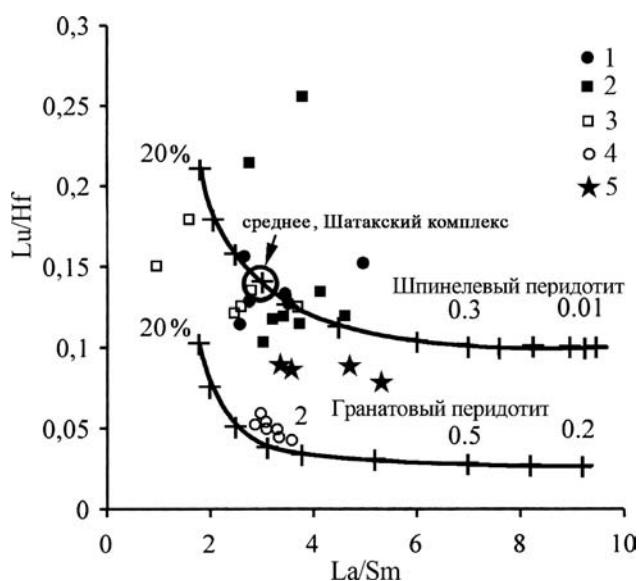


Рис. 4. Диаграмма Lu/Hf–La/Sm по [Regelous et al., 2003] для магматических пород Шатакского комплекса и пикритов Башкирского мегантиклинория

Условные обозначения: 1–3 — Шатакский комплекс (1 — пикриты, 2 — базальты кузьелгинской подсвиты, 3 — базальты каранской подсвиты); 4 — пикриты Мисаелгинского и Лысогорского комплексов; 5 — пикриты Лапыштинского комплекса. 4, 5 — по [Ковалев, 2011].

Fig. 4. Diagram Lu/Hf–La/Sm after [Regelous et al., 2003] for igneous rocks of the Shatak complex and picrites of the Bashkir meganticlinorium

Legend: 1–3 — Shatak complex (1 — picrites, 2 — basalts of the Kuzyelga subformation, 3 — basalts of the Karan subformation); 4 — picrites of the Misaelga and Lysogorsk complex; 5 — picrites of the Lapyshita complex. 4, 5 — according to [Kovalev, 2011].

видно из рис. 5, четкой приуроченности отдельных элементов к определенному типу пород не просматривается.

Распределение редкоземельных элементов в конгломератах машакской свиты характеризуется широким разбросом значений (на два порядка) всей группы РЗЭ при практически полной идентичности трендов (рис. 5а), что, на наш взгляд, обусловлено переменным количеством кварцевого материала галек в пробах. Для большей части важных геохимических отношений элементов средние значения этих отношений в шатакских конгломератах в значительной степени превышают количества, характерные для верхней коры по [Rudnick, Gao, 2003] ( $Nb/Ta$  — конгломераты — 31.14; верхняя кора — 13.4;  $Zr/Hf$  — 105.16 и 36.7;  $K/Rb$  — 375.1 и 283;  $Rb/Cs$  — 52.38 и 20, соответственно). В то же время  $K/Rb$  оказывается близким (9499 — в конгломератах и 9475 — в верхней коре), а  $Th/U$  (2.45 в конгломератах и 3.8 в верхней коре) свидетельст-

вует о повышенных количествах урана в шатакских конгломератах по отношению к торию.

Определенный интерес представляют нормализованные средние содержания редких, рассеянных и «рудогенных» элементов в конгломератах машакской свиты, изображенные на рис. 5б. Обобщенный анализ содержаний и распределения этих элементов в конгломератах сводится к следующему:

- содержания практически всех элементов в конгломератах кузьелгинской и каранской подсвиты близки между собой, что позволяет говорить о едином механизме их перераспределения и накопления;
- аномально высокие содержания As, Se и Sn свидетельствуют о наличии в конгломератах определенного минералого-геохимического типа оруденения (арсенипирит, селениды), частично подтвержденного минералогическими исследованиями [Ковалев и др., 2017];
- относительно низкие содержания Co и Ni, элементов, типоморфных для магматических пород основного состава, еще раз подчеркивают

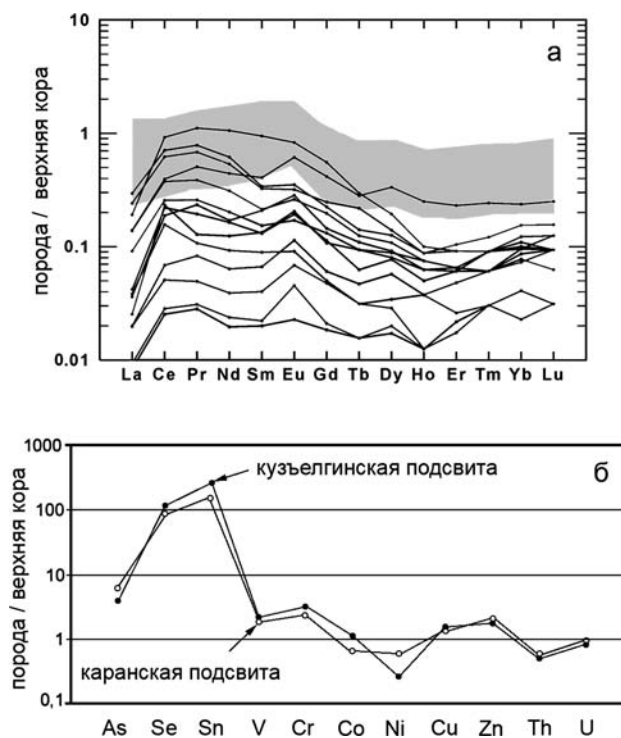


Рис. 5. Геохимические диаграммы для терригенных пород машакской свиты. Залитое поле — песчаники по [Маслов и др., 2008]. Верхняя кора по [Rudnick, Gao, 2003]

Fig. 5. Geochemical diagrams for terrigenous rocks of the Mashak Formation. The grey field characterizes sandstones according to [Maslov et al., 2008]. Upper crust by [Rudnick, Gao, 2003]



особенности машакских конгломератов, а именно практически полное отсутствие магматических пород в составе обломочного материала, свидетельствующее об интрузивной природе значительной части «базальтов», что более детально было рассмотрено ранее [Ковалев, Высоцкий, 2008];

— повышенные количества халькофильных элементов обусловлены наличием сульфидной минерализации, описанной ранее [Ковалев и др., 2017].

Содержания и распределение благородных металлов в породах машакской свиты, так же как и описанных выше элементов, подчеркивает особенности их генезиса.

Анализ нормализованных содержаний платиноидов и золота в различных разновидностях магматических пород Шатакского комплекса (рис. 6) позволяет сделать следующие выводы:

— для всех разновидностей пород (пикриты, базальты, риолиты) Шатакского комплекса характерна Rh–Pd–Au специализация; Pt/Pd в породах варьирует в значительных пределах: пикри-

ты — 0.1–0.27; базальты кузьелгинской под-  
свиты — 0.17–0.63; риолиты — 0.09–0.41; базаль-  
ты каранской подсвиты — 0.04–1.18;

— по отношению суммы платиноидов к золоту ( $\Sigma\text{PGE}/\text{Au}$ ) в магматических породах комплекса наблюдается незакономерная смена специализации с платинометальной на золотую (пикриты — 1.16–2.12; риолиты — 0.6–4.36; базальты кузьелгинской подсвиты — 0.42–3.03; базальты каранской подсвиты — 0.13–3.67);

— для всех благороднометалльных элементов характерен значительный разброс абсолютных значений содержаний, достигающий двух порядков.

Для распределения нормализованных содержаний благородных металлов в терригенных породах свиты характерна своя специфика, которая заключается в следующем (рис. 7):

— благороднометалльная геохимическая специализация аналогична для пород обеих подсвит и может быть охарактеризована как Ir–Rh–Pd или Ir–Pd–Rh;

— по платино-палладиевому отношению породы подсвит в значительной степени различаются;

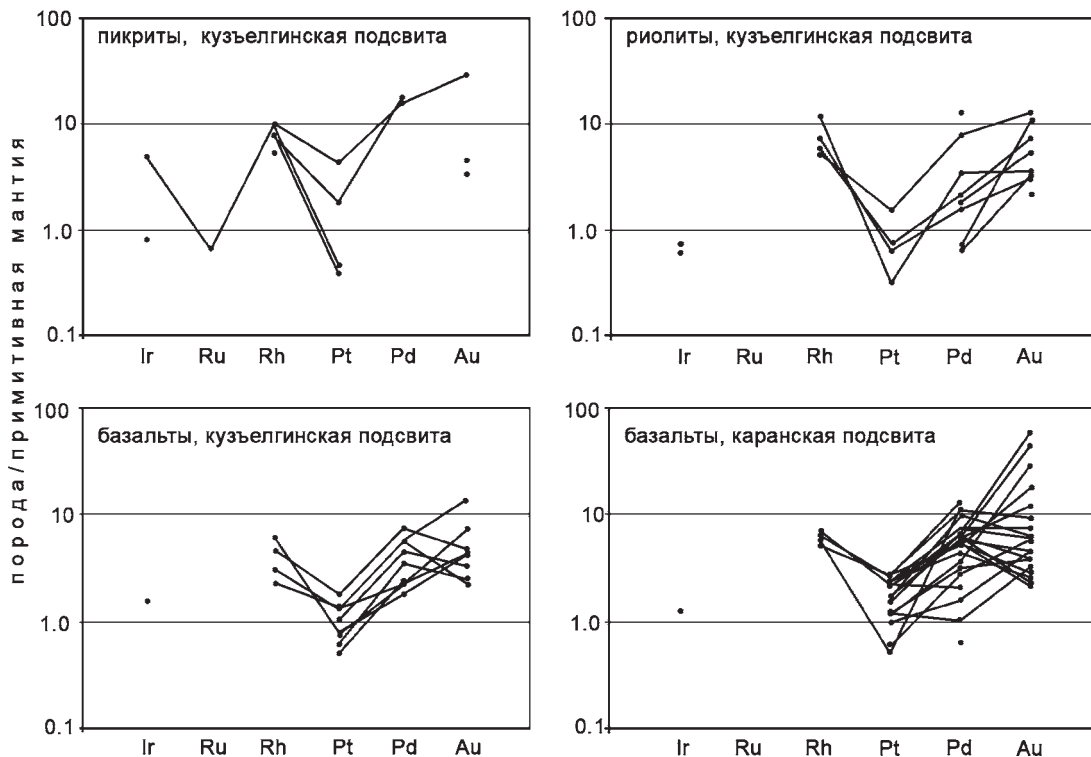


Рис. 6. Графики нормализованных содержаний благородных металлов в магматических породах Шатакского комплекса. Примитивная мантия по [McDonough, Sun, 1995]

Fig. 6. Charts of normalized contents of noble metals in igneous rocks of the Shatak complex. Primitive mantle according to [McDonough, Sun, 1995]

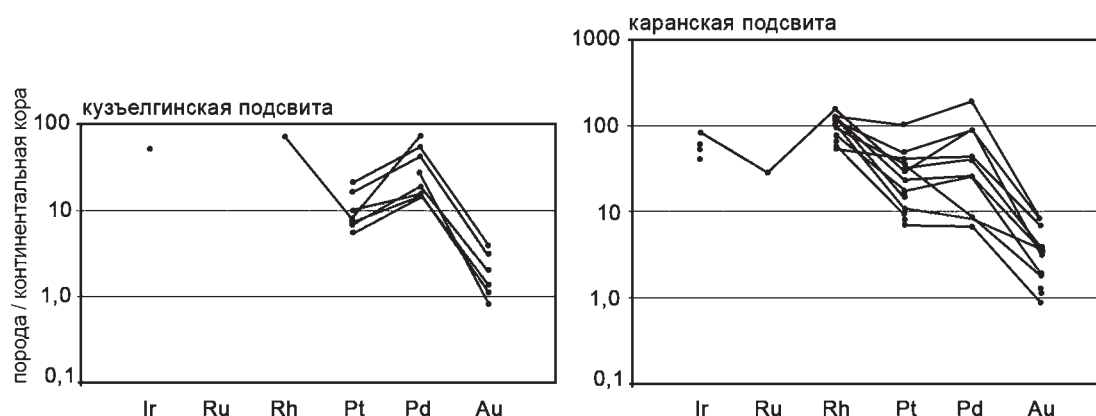


Рис. 7. Графики нормализованных содержаний благородных металлов в осадочных породах машакской свиты. Континентальная кора по [Wedepohl, 1995]

Fig. 7. Graphs of the normalized contents of noble metals in sedimentary rocks of the Mashak Formation. Continental crust according to [Wedepohl, 1995]

если для терригенных отложений кузьелгинской подсвиты Pt/Pd меньше единицы (от 0.1 до 0.63), то в породах каранской подсвиты эта величина варьирует в пределах от 0.33 до 4.11;

— для всех терригенных пород свиты отношение суммы платиноидов к золоту ( $\Sigma\text{PGE}/\text{Au}$ ) всегда больше единицы, достигая максимальных величин — 120.11–122.25 в породах каранской подсвиты.

Определенный интерес представляет анализ средних нормализованных содержаний благородных металлов в породах комплекса, позволяющий выявить общие закономерности в их распределе-

нии. Как видно из рис. 8, для всех магматических пород Шатакского комплекса характерны обогащение золотом и палладием и пониженные по отношению к примитивной мантии количества иридия и рутения. Распределение родия и платины несколько сложнее. Если количества Pt группируются вблизи «нормы» (среднее для всех разновидностей магматических пород — 1.08), то среднее содержание Rh для всех разновидностей — 4.7, почти в пять раз выше мантийного. Обогащенность магматических пород Au, Pd и Rh — «низкотемпературными» элементами, характерными для пород основного состава, — свидетельствует о том, что расплав,

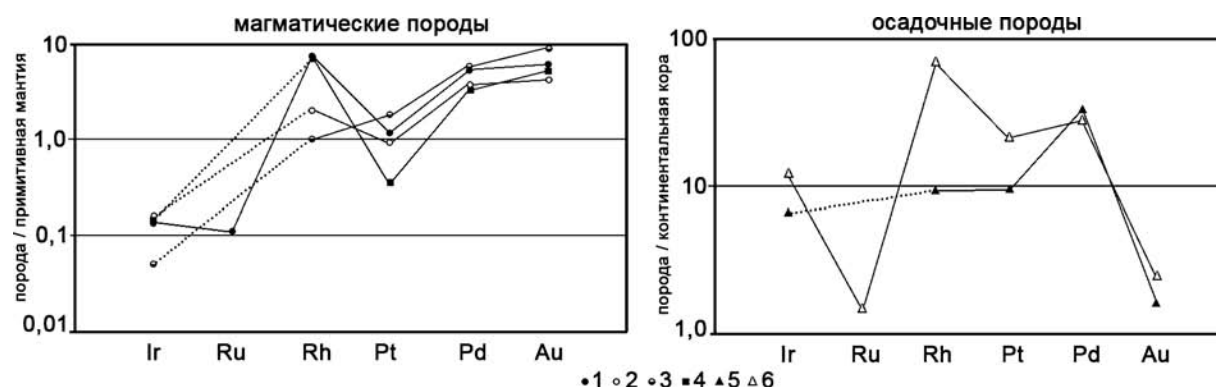


Рис. 8. Графики нормализованных средних содержаний благородных металлов в магматических и осадочных породах машакской свиты

Условные обозначения: 1 — пикриты; 2 — базальты кузьелгинской подсвиты; 3 — базальты каранской подсвиты; 4 — риолиты; 5 — осадочные породы кузьелгинской подсвиты; 6 — осадочные породы каранской подсвиты.

Fig. 8. Graphs of normalized average contents of noble metals in igneous and sedimentary rocks of the Mashak suite

Legend: 1 — picrites; 2 — basalts of Kuzelga subformation; 3 — basalts of the Karan subformation; 4 — rhyolites; 5 — sedimentary rocks of the Kuzelga subformation; 6 — sedimentary rocks of the Karan subformation.

сформировавший все разнообразие магматических пород Шатакского комплекса соответствовал по составу пикробазальту, а все вариации содержаний благородных металлов обусловлены его внутрикамерной дифференциацией и последующим метаморфизмом пород.

Для осадочных пород кузельгинской и каранской подсвит характерны как общие черты в распределении благородных металлов, так и определенная специфика (см. рис. 8). В частности, количество всей группы платиноидов и золота больше, чем в континентальной коре; Pt/Pd меньше 1 (0.34 для кузельгинской подсвиты и 0.67 — для каранской); относительно высокие  $\Sigma\text{PGE}/\text{Au}$  и Pd/Ir (15.73 и 5.07 для кузельгинской подсвиты и 35.45 и 2.32 — для каранской, соответственно). Кроме того, различия заключаются в значительно большем количестве платины и родия в осадочных отложениях каранской подсвиты по сравнению с кузельгинской.

На диаграмме PGE/Au – Pt/Pd (рис. 9а) точки средних значений магматических пород Шатакского комплекса образуют комплементарный ряд с аналогами Кусинско-Копанского комплекса и в значительной степени отличаются от значений, рассчитанных для пикритов Ишлинского и Лысогорского комплексов. По сравнению с примитивной мантией все разновидности пород Шатакского комплекса обогащены золотом и палладием, а по сравнению с континентальными толеитами —  $\Sigma\text{PGE}$  при близких значениях Pt/Pd.

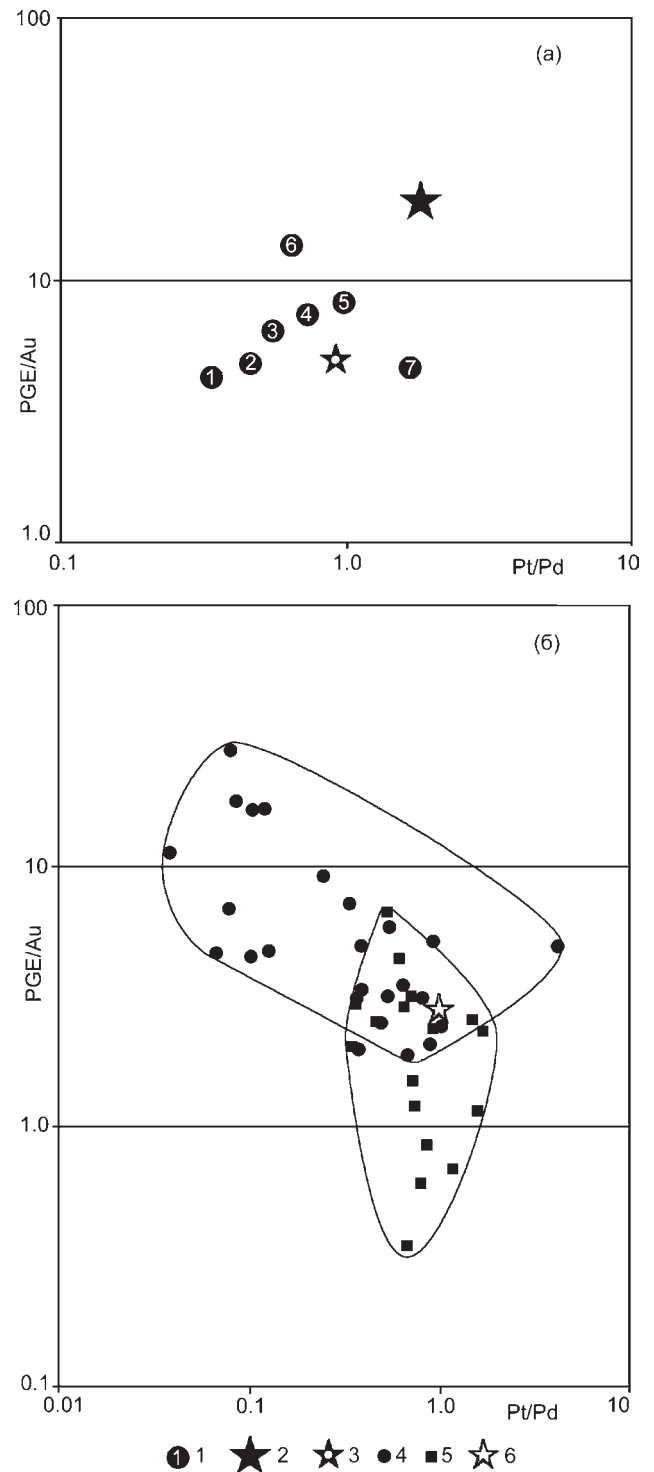
**Рис. 9. Диаграмма  $\Sigma\text{PGE}/\text{Au}$  – Pt/Pd для магматических (а) и осадочных (б) пород машакской свиты**

*Условные обозначения:* 1 — средние значения для магматических пород Башкирского мегантиклинория: (1–4 — Шатакский комплекс: 1 — пикриты, 2 — риолиты, 3 — базальты кузельгинской подсвиты, 4 — базальты каранской подсвиты; 5 — габбро, пироксениты, Кусинско-Копанский комплекс; 6 — пикриты, Лысогорский комплекс; 7 — пикриты, Ишлинский комплекс); 2 — примитивная мантия по [McDonough, Sun, 1995]; 3 — континентальные толеиты по [Barnes, Maier, 1999]; 4 — терригенные породы, Шатакский комплекс; 5 — терригенные породы, месторождение Улюк-Бар; 6 — континентальная кора по [Rudnick, Gao, 2003].

**Fig. 9. PGE/Au – Pt/Pd diagram for igneous (a) and sedimentary (b) rocks of the Mashak suite**

*Legend:* 1 — average values for igneous rocks of the Bashkir meganticlinorium: (1–4 — Shatak complex: 1 — picrites, 2 — rhyolites, 3 — basalts of the Kuzelga subformation, 4 — basalts of the Karan subformation; 5 — gabbro, pyroxenites, Kusa-Kopan complex; 6 — picrites, Lysogorsk complex; 7 — picrites, Ishlia complex); 2 — primitive mantle according to [McDonough, Sun, 1995]; 3 — continental tholeiites according to [Barnes, Maier, 1999]; 4 — terrigenous rocks, Shatak complex; 5 — terrigenous rocks, Ulyuk-Bar deposit; 6 — continental crust according to [Rudnick, Gao, 2003].

Особенности благороднометалльной геохимической специализации терригенных пород машакской свиты хр. Бол. Шатак (см. рис. 9б) выявляются при сравнении рассчитанных отношений с аналогами, характерными для пород золоторудного месторождения Улюк-Бар, расположенного в 4–5 км западнее. Как видно из приведенного графика,





вариации  $\Sigma\text{PGE}/\text{Au}$  и  $\text{Pt}/\text{Pd}$  в анализируемых породах имеют разнонаправленные векторы: для пород хр. Бол. Шатак — повышенные количества суммы платиноидов при преобладании палладия; месторождения Улюк-Бар — вариации в содержаниях платиноидов и золота при незначительных изменениях  $\text{Pt}/\text{Pd}$ .

### Заключение

Подводя итог изложенному выше материалу, следует констатировать:

- разнообразие геохимических характеристик магматических пород Шатакского комплекса обусловлено процессами дифференциации расплава в промежуточном очаге. По эталонным геохимическим отношениям ( $\text{Th}/\text{Yb} - \text{Ta}/\text{Yb}$ ,  $\text{Nb}/\text{Y} - \text{Zr}/\text{Y}$ ,  $\text{Lu}/\text{Hf} - \text{La}/\text{Sm}$ ) механизмом образования расплава являлся плюмовый процесс [Пучков, Ковалев, 2013], который в среднерифейское время привел к рифтогенезу активного типа [Ковалев, 2004] и формированию вулкано-интрузивной ассоциации. Поведение благородных металлов при этом определялось многоуровневой внутрикамерной дифференциацией расплава;
- содержания и распределение редкоземельных элементов, платиноидов и золота в осадочных породах, вмещающих Шатакский комплекс, обусловлены прямым воздействием на них вулканоплутонического магматизма с последующим перераспределением вещества при динамотермальном метаморфизме.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 17-45-020045 (аналитические исследования) и в рамках Государственного задания, тема № 0252-2017-0012 (полевые работы).*

### Список литературы:

Алексеев А.А. Рифейско-вендский магматизм западного склона Южного Урала. — М.: Наука, 1984. — 137 с.

Иванов А.И. К стратиграфии и древнему орогенезу западного склона Южного Урала. // Тр. Баш. геол. управл. — 1937. — Вып. 7. — С. 2–28.

Высоцкий С.И., Ковалев С.Г., Ковалев С.С. К вопросу о метаморфизме пород Шатакского комплекса (Башкирский мегантиклинорий) // Вестник Академии наук РБ. — 2019. Т. 30, № 1(93). — С. 69–78.

Ковалев С.Г. Дифференцированные диабаз-пикритовые комплексы западного склона Южного Урала. — Уфа: ИГ УНЦ РАН, 1996. — 90 с.

Ковалев С.Г. Динамика формирования среднерифейской рифтогенной структуры (западный склон Южного Урала) // Докл. РАН. — 2004. — Т. 396, № 2. — С. 219–222.

Ковалев С.Г. Новые данные по геохимии диабаз-пикритового магматизма западного склона Южного Урала и условия его формирования // Литосфера. — 2011. — № 2. — С. 68–83.

Ковалев С.Г., Высоцкий И.В. Новый тип благороднометальной минерализации в терригенных породах Шатакского грабена (западный склон Южного Урала) // Литология и полезные ископаемые. — 2006. — № 4. — С. 415–421.

Ковалев С.Г., Высоцкий И.В. Новые данные по геологии Шатакского комплекса (западный склон Южного Урала) // Литология и полезные ископаемые. — 2008. — № 3. — С. 280–289.

Ковалев С.Г., Высоцкий С.И., Ковалев С.С. Модель образования магматических пород Шатакского комплекса // Геологический вестник. — 2018. — № 2. — С. 3–13. — doi:org/10.31084/2619-0087/2018-2-1.

Ковалев С.Г., Высоцкий С.И., Ковалев С.С., Котляров В.А. Сульфидно-селенидная минерализация в вулканогенно-осадочных породах Шатакского комплекса (Башкирский мегантиклинорий) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. — 2017. — № 7. — С. 21–27. — doi:org/10.19110/2221-1381-2017-7-21-27.

Краснобаев А.А., Козлов В.И., Пучков В.Н., Нехорошева А.Г., Лепехина Е.Н. Машакский вулканизм: ситуация 2008 // Структурно-вещественные комплексы и проблемы геодинамики докембрия фанерозойских орогенов: III Чтения памяти С.Н. Иванова. — Екатеринбург, 2008. — С. 61–63.

Краснобаев А.А., Козлов В.И., Пучков В.Н., Бушарина С.В., Сергеева Н.Д., Падерин И.П. Цирконовая геохронология машакских вулканитов и проблема возраста границы нижний–средний рифей (Южный Урал) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. — 2013. — Т. 21, № 5. — С. 3–20.

Львов К.А. К тектонике западного склона Южного Урала // Уч. зап. Казанского гос. ун-та. — 1936. — Т. 96, Вып. 102, Кн. 3. — С. 27–32.

Маслов А.В., Ножкин А.Д., Подковыров В.Н., Летникова Е.Ф., Туркина О.М., Гражданкин Д.В., Дмитриева Н.В., Ишерская М.В., Крупенин М.Т., Ронкин Ю.Л., Гареев Э.З., Вещева С.В., Лепихина О.П. Геохимия тонкозернистых терригенных пород верхнего докембрия Северной Евразии. — Екатеринбург: УрО РАН, 2008. — 274 с.

Парначев В.П., Ротарь А.Ф., Ротарь З.М. Среднерифейская вулканогенно-осадочная ассоциация Башкирского мегантиклинория (Южный Урал). — Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. — 105 с.

Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). — Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. — 280 с.

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.

Пучков В.Н., Краснобаев А.А., Козлов В.И., Матуков Д.И., Нехорошева А.Г., Лепехина Е.Н., Сергеев С.А. Предварительные данные о возрастных рубежах нео- и мезопротерозоя в свете новых U-Pb датировок // Геологический сборник № 6 / ИГ УНЦ РАН. — Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2007. — С. 3–14.

Ротарь А.Ф., Ротарь З.М., Парначев В.П. Стратиграфия шатакской свиты среднего рифея на Южном Урале // Стратиграфия и литология докембрийских и раннепалеозойских отложений Урала. — Свердловск: ИГиГ, 1982. — С. 53–64.

Савельев Д.Е., Пучков В.Н., Ардисламов Ф.Р., Сначев В.И. Вулканогенные породы машакской свиты среднего рифея: геология и петрогеохимия // Литосфера. — 2009. — № 4. — С. 3–26.

Стратиграфические схемы Урала (докембрий, палеозой). — Екатеринбург: Роскомнедра, ИГГ УрО РАН, 1993. — 151 с.

Barberi F., Ferrara G., Santacroce R., Treuil M., Varet J. A transitional basalt-pantellerite sequence of fractional crystallisation, the Boina centre (Afar rift, Ethiopia) // J. Petrol. — 1975. — Vol. 16, No. 1. — P. 22–56. — doi.org/10.1093/petrology/16.1.22.

Barnes S.-J., Maier W.D. The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulfide liquids exploration // C.E.G. Geological Association of Canada, 1999. Short Course. Vol. 13. — P. 69–106.

Chaplygin I.V., Mozgova N.N., Mokhov A.V., Koporulina E.V., Bernhardt H.J., Bryzgalov I.A. Minerals of the system ZnS–CdS from fumaroles of the Kudriavy volcano, Iturup island, Kuriles, Russia // The Canadian Mineralogist. — 2007. — Vol. 45, No. 4. — P. 709–722. — doi.org/10.2113/gscanmin.45.4.709.

McDonough W.F., Sun S.-S. Composition of the Earth // Chemical Geology 120. — 1995. — P. 223–253. — doi: 10.1016/0009-2541(94)00140-4.

Regelous M., Hofmann A.W., Aboushami W., Galer S.J.G. Geochemistry of lavas from the Emperor Seamounts, and the geochemical evolution of Hawaiian magmatism from 85 to 42 Ma // J. Petrology. — 2003. — Vol. 44, No. 1. — P. 113–140. — doi.org/10.1093/petrology/44.1.113.

Rudnick R.L., Gao S. Composition of the Continental Crust // Treatise on Geochemistry. — 2003. — Vol. 3. — P. 1–64. — doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03016-4.

Sun S.-S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for the mantle composition and processes // Geol. Soc., London, Spec. Publ. — 1989. — Vol. 42, No. 1. — P. 313–345. — doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19.

Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust; its composition and evolution. — Cambridge: Blackwell, 1985. — 312 p.

Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // Geochimica et Cosmochimica Acta. — 1995. — V. 59, No. 7. — P. 1217–1232. — doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2.

### References:

Alekseyev A.A. Rifeisko-vendский магматизм западного склона Южного Урала [Riphean-Vendian magmatism of the Southern Urals]. M.: Nauka, 1984. 137 p. (In Russian).

Barberi F., Ferrara G., Santacroce R., Treuil M., Varet J. A transitional basalt-pantellerite sequence of fractional crystallisation, the Boina centre (Afar rift, Ethiopia) // J. Petrology. 1975. Vol. 16, No. 1. P. 22–56. doi.org/10.1093/petrology/16.1.22.

Barnes S.-J., Maier W.D. The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulfide liquids exploration

// C.E.G. Geological Association of Canada, 1999. Short Course. Vol. 13. P. 69–106.

Chaplygin I.V., Mozgova N.N., Mokhov A.V., Koporulina E.V., Bernhardt H.J., Bryzgalov I.A. Minerals of the system ZnS–CdS from fumaroles of the Kudriavy volcano, Iturup island, Kuriles, Russia // The Canadian Mineralogist. 2007. Vol. 45, No. 4. P. 709–722. doi.org/10.2113/gscanmin.45.4.709.

Ivanov A.I. K stratigrafii i drevnemu orogenezu zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala [To the stratigraphy and the ancient orogenesis of the western slope of the Southern Urals] // Tr. Bash. geol. uprav. 1937. Rel. 7. P. 2–28. (In Russian).

Kovalev S.G. Differentirovannye diabaz-pikritovye komplekсы западного склона Южного Урала [Differentiated diabase-picrite complexes of the western slope of the Southern Urals]. Ufa: IG UNTS RAN, 1996. 90 p. (In Russian).

Kovalev S.G. Dinamika formirovaniya srednerifeiskoi riftogennoi struktury (zapadniy sklon Yuzhnogo Urala) [Formational Dynamics of the Middle Riphean Riftogenous Structure (the Western Slope of the Southern Ural)] // Doklady RAN. 2004. Vol. 396, No. 2. P. 219–222. (In Russian).

Kovalev S.G. Novye dannye po geokhimii diabaz-pikritovogo magmatizma западного склона Южного Урала i usloviya ego formirovaniya [New data on the geochemistry of diabase-picrite magmatism of the western slope of the Southern Urals and the history of its formation] // Litosfera. 2011. No. 2. P. 68–83. (In Russian).

Kovalev S.G., Vysotskiy I.V. A new type of noble metal mineralization in terrigenous rocks of the Shatak graben, western slope of the southern Urals // Lithol. and Miner. Res. 2006. Vol. 41, No. 4. P. 371–377. doi.org/10.1134/S0024490206040079.

Kovalev S.G., Vysotskiy I.V. New data on geology of the Shatak Complex (western slope of the Southern Urals) // Lithology and Mineral Resources. 2008. Vol. 43, No. 3. P. 250–259. doi.org/10.1134/S0024490208030048.

Kovalev S.G., Vysotskiy S.I., Kovalev S.S. Model' obrazovaniya magmaticeskikh porod Shatakskogo kompleksa [Model of origin of magmatic rocks of the Shatak complex] // Geologicheskii vestnik. 2018. No. 2. P. 3–13. (In Russian). doi.org/10.31084/2619-0087/2018-2-1.

Kovalev S.G., Vysotskiy S.I., Kovalev S.S., Kotlyarov V.A. Sul'fidno-selenidnaya mineralizatsiya v vulkanogenno-osadochnykh porodakh Shatakskogo kompleksa (Bashkirskii megantiklinorii) [Sulphide-selenide mineralization in volcanogenic-sedimentary rocks of the Shatak complex (Bashkirian meganticlinorium)] // Vestnik IG Komi NTS UrO RAN. 2017. No. 7. P. 21–27. (In Russian). doi.org/10.19110/2221-1381-2017-7-21-27.

Krasnobayev A.A., Kozlov V.I., Puchkov V.N., Nekhorosheva A.G., Lepekhina Ye.N. Mashakskii vulkanizm: situatsiya 2008 [Mashaksky volcanism: situation 2008] // Strukturno-veshchestvennye komplekсы i problemy geodinamiki dokembriya fanerozoiskikh orogenov: III Chteniya pamyati S.N. Ivanova [Lithotectonic complexes and geodynamic problems of the Precambrian Phanerozoic orogens: III Readings memory S.N. Ivanova]. Yekaterinburg, 2008. P. 61–63. (In Russian).

Krasnobayev A.A., Kozlov V.I., Puchkov V.N., Busharina S.V., Sergeeva N.D., Paderin I.P. Tsirkonovaya geokhronologiya mashakskikh vulkanitov i problema vozrasta granitsy nizhnii-sredniy rifey (Yuzhnyy Ural) [Zirconium geochronology of Mashak volcanic rocks and the problem of the age of the

- boundary of the lower-middle rife (South Urals)] // Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyatsiya. 2013. V. 21, No. 5. P. 3–20 (In Russian).
- L'vov K.A.* K tektonike zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala [To the tectonics of the western slope of the Southern Urals] // Uch. zap. Kazanskogo gos. un-ta. 1936. Vol. 96, rel. 102, book 3. P. 27–32. (In Russian).
- Maslov A.V., Nozhkin A.D., Podkovyrov V.N., Letnikova Ye.F., Turkina O.M., Grazhdankin D.V., Dmitriyeva N.V., Isherskaya M.V., Krupenin M.T., Ronkin Yu.L., Gareyev E.Z., Veshcheva S.V., Lepikhina O.P.* Geokhimiya tonkozemnykh terrigennykh porod verkhnego dokembriya Severnoi Evrazii [Geochemistry of fine-grained terrigenous rocks of the Upper Precambrian of Northern Eurasia]. Yekaterinburg: UrO RAN, 2008. 274 p. (In Russian).
- McDonough W.F., Sun S.-S.* Composition of the Earth // Chemical Geology 120. 1995. P. 223–253. doi: 10.1016/0009-2541(94)00140-4.
- Parnachev V.P., Rotar' A.F., Rotar' Z.M.* Srednerifeiskaya vulkanogenno-osadochnaya assotsiatsiya Bashkirskogo megantiklinoriya (Yuzhnyi Ural) [Middle Riphean volcanogenic-sedimentary association of the Bashkir meganticlinorium (South Urals)]. Sverdlovsk: UNTS AN SSSR. 1986. 105 p. (In Russian).
- Puchkov V.N.* Geologiya Urala i Priural'ya (aktual'nye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodinamiki i metallogenii) [Geology of the Urals and Cis-Urals (actual problems of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny)]. Ufa: DizaynPoligrafServis, 2010. 280 p. (In Russian).
- Puchkov V.N., Kovalev S.G.* Plyumovye sobytiya na Urale i ikh svyaz' s subglobal'nymi epokhami riftogeneza [Plume events in the Urals and their connection with subglobal riftogenesis eras] // Kontinental'nyi riftogenez, soputstvuyushchie protsessy [Continental rifting, related processes]. Irkutsk: IZK SO RAN. 2013. P. 34–38. (In Russian).
- Puchkov V.N., Krasnobayev A.A., Kozlov V.I., Matukov D.I., Nekhorosheva A.G., Lepikhina Ye.N., Sergeev S.A.* Predvaritel'nye dannye o vozrastnykh rubezhakh neo- i mezoproterozoya v svete novykh U-Pb datirovok [Preliminary data on the age of neo- and mezoproterozoic in the light of new U-Pb datings] // Geologicheskii sbornik No. 6 / IG UNTS RAS. Ufa: DizaynPoligrafServis, 2007. P. 3–14. (In Russian).
- Regelous V., Hofmann A.W., Aboushahi W., Galer S.J.G.* Geochemistry of lavas from the Emperor Seamounts, and the geochemical evolution of Hawaiian magmatism from 85 to 42 Ma // J. Petrology. 2003. Vol. 44, No. 1. P. 113–140. doi.org/10.1093/petrology/44.1.113.
- Rotar' A.F., Rotar' Z.M., Parnachev V.P.* Stratigrafiya shatakskoi svity srednego rifeya na Yuzhnom Urale [Stratigraphy of the Shatak Formation of the Middle Riphean in the Southern Urals] // Stratigrafiya i litologiya dokembriy i rannepaleozoi-skikh otlozhenii Urala [Stratigraphy and lithology of Precambrian and Early Paleozoic Ural deposits]. Sverdlovsk: IGI, 1982. P. 53–64. (In Russian).
- Rudnick R.L., Gao S.* Composition of the Continental Crust // Treatise on Geochemistry. 2003. Vol. 3. P. 1–64. doi.org/10.1016/b0-08-043751-6/03016-4.
- Savel'yev D.Ye., Puchkov V.N., Ardislamov F.R., Sna-chev V.I.* Vulkanogennye porody mashakskoi svity srednego rifeya: geologiya i petrogeokhimiya [Volcanic rocks of the Mashak Formation of the Middle Riphean: geology and petrogeochemistry] // Litosfera. 2009. No. 4. P. 3–26. (In Russian).
- Stratigraficheskiye skhemy Urala (dokembriy, paleozoy). Yekaterinburg: Roskomnedra, IGG UrO RAN, 1993. 151 p. (In Russian)
- Sun S.S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for the mantle composition and processes // Geol. Soc., London, Spec. Publ. 1989. Vol. 42, No. 1. P. 313–345. doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19.
- Taylor S.R., McLennan S.M.* The continental crust; its composition and evolution. Cambridge: Blackwell, 1985. 312 p.
- Vysotskiy S.I., Kovalev S.G., Kovalev S.S.* K voprosu o metamorfizme porod Shatakskogo kompleksa (Bashkirskiy megantiklinoriy) [On metamorphism of rocks of the Shatak complex (Bashkirian meganticlinorium)] // Vestnik Akademii nauk RB. 2019. T. 30, No. 1(93). P. 69–78 (In Russian)
- Wedepohl K.H.* The composition of the continental crust // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1995. V. 59, No. 7. P. 1217–1232. doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2.

#### Сведения об авторах:

**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 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

#### About the author:

**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 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