

ABSOLUTE AGE, GEOCHEMISTRY AND PETROLOGY OF SYENITES AND MONZONITES OF THE SIYA-USHPINSKY INTERFLUVE OF GORNY ALTAI
Absolute age, geochemistry and petrology of syenites and monzonites of the Siya-Ushpinsky interfluve of Gorny Altai

Anatoly I. Gusev, Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University, 53, Vladimir Korolenko street, Biysk, 659333, Russia. E-mail: anzerg@mail.ru

Evgeniya M. Tabakaeva, Altai State University, 61, Lenin avenue, Barnaul, 656049, Russia. E-mail: tabakaevaem@mail.ru

Anatoly I. Gusev, Dr. Sc., professor, Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University

Evgeniya M. Tabakaeva, Cand. Sc., associate professor, Altai State University

The relevance of the research is due to the need to clarify the absolute age and to study the features of petrology and geochemistry of alkaline rocks – syenites and monzonites of the Siya-Ushpinsky interfluve in the northeastern Altai mountains – in order to determine the formation patterns of the associated gold mineralization. The problem of the origin of alkaline igneous rocks continues to interest of scientists in many countries due to the fact that these are the rocks used to confirm the mantle-crustal interaction and to determine the nature of the evolution of the continental crust. Today, there is still no single position on their origin.

The aims of the research are to clarify the absolute age of alkaline syenites of the Ul'men ore field and to study the petrological and geochemical features of syenitoids and monzonites of the Siya-Ushpinsky interfluve using a complex of petrological diagrams which help to reveal the physicochemical features of petrogenesis.

Objects of the research are: syenitoids and monzonites of the Ul'men pyroxenite-syenite-monzonite-gabbro complex of the Middle Cambrian, located in the Siya-Ushpinsky interfluve. This territory is located within the anomalous tectonic block formed at the junction of the Gorno-Altai, Gorno-Shor and Salair structures. The main faults of this tectonic block have a northeastern orientation and are accompanied by tectonites with signs of shear plastic flow. Among the minerals, the objects of study are zircons from alkaline syenites of the western section of the Ul'men ore field.

Methods. The composition of rocks was determined by Optima 4300 DV inductive coupled plasma optical emission spectrometer in the Laboratory A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (Saint-Petersburg). The absolute age of the rocks was determined by the U-Pb secondary ion mass spectrometry method using a SHRIMP-II ion microprobe on zircon in the same laboratory.

Results. Syenites in the Siya-Ushpinsky interfluve have the absolute age of 501 ± 4 Ma, which corresponds to the end of the Middle Cambrian. Data on the composition of syenites and monzonites of the Bolshoi Lichim, Ushpa, Ul'meni, Upper Karakan, Salazan areas within the Siya-Ushpinsky interfluve were obtained. The sequence of the formation of rocks with the separation of three phases is established: phase 1 – monzonite, phase 2 – syenite, phase 3 – alkaline syenite. The composition of monzonites and syenites corresponds to the shoshonite series of rocks. High ratios of Nb / Ta (from 19.0 to 31.4) and Zr / Hf (from 30.4 to 60.6) in syenitoids and monzonites of the Siya-Ushpinsky interfluve indicate the involvement of lower crust material in melting. Relatively low concentrations of Ni (from 2.3 to 4.1 ppm), Cr (from 1.0 to 3.2 ppm) and MgO (from 0.27 to 1.39%) in syenites and monzonites indicate that they could not be the product of direct melting of mantle magma and the result of fractionation of mafic minerals from the evolved melt. Consequently, in the generation of syenites and monzonites of the Siya-Ushpinsky interfluve, the main role was played by melts formed as a result of partial melting of the lower thickened crust. In the experimental diagrams that allow the restoration of the source of melting for igneous rocks, the compositions of syenitoids and monzonites of the Siya-Ushpinsky interfluve fall or close to the melting fields of amphibolites and graywackes. In the studied rocks, the tetrad effect of fractionation of M-type REEs was revealed, which indicates their saturation with fluids, among which such volatile components as CO₂ and H₂O, played an important role. The latter were of key importance for the transfer of gold. The author's diagram Au - TE_{1,3} shows the trend of an increase in gold concentrations with an increase in the tetrad effect of fractionation of M-type REEs. Spatially, the area of distribution of syenites and monzonites is associated with numerous manifestations of gold, gold-bearing placers, as well as the Ulmen gold-copper-skarn deposit. In the latter, the richest mineralization gravitates to the syenite dikes.

Key words:

alkaline magmatism, syenites, monzonites, petrology, zircon, tetrad effect fractionation of rare earth elements, gold, Altai mountains.

УДК 553.3/4:553.2:550.4

АБСОЛЮТНЫЙ ВОЗРАСТ, ГЕОХИМИЯ И ПЕТРОЛОГИЯ СИЕНИТОВ И МОНЦОНИТОВ СИА-УШПИНСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ ГОРНОГО АЛТАЯ

Гусев Анатолий Иванович, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры естественно-научных дисциплин Алтайского государственного гуманитарно-педагогического университета имени В.М. Шукшина, Россия, 659333, г. Бийск, ул. Владимира Короленко, 53. E-mail: anzerg@mail.ru

Табакеева Евгения Михайловна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры экономической географии и картографии Алтайского государственного университета, Россия, 656049, г. Барнаул, пр. Ленина, 61. E-mail: tabakaevaem@mail.ru

Актуальность выполненных исследований определяется необходимостью уточнения абсолютного возраста, изучения петрологии и геохимии щелочных пород — сиенитов и монцонитов Сия-Ушпинского междуречья на северо-востоке Горного Алтая для определения закономерностей формирования связанного с ними золотого оруденения. Проблема генезиса щелочных изверженных пород продолжает привлекать внимание ученых многих стран в связи с тем, что эти породы используются для подтверждения мантийно-корового взаимодействия и определения характера эволюции континентальной коры. Сегодня ещё нет единой позиции на их происхождение.

Цель: определить абсолютный возраст щелочных сиенитов Ульменского рудного поля, изучить петрологические и геохимические особенности сиенитоидов и монцонитов Сия-Ушпинского междуречья с использованием комплекса петрологических диаграмм, позволяющих выявлять физико-химические особенности петрогенезиса.

Объекты: сиенитоиды и монцониты ульменского пироксенит-сиенит-монцонит-габбрового комплекса среднего кембрия, расположенные в Сия-Ушпинском междуречье, которое приурочено к аномальному тектоническому блоку, сформировавшемуся на стыке горно-алтайских, горно-шорских и салаирских структур. Главные разломы этого тектонического блока имеют северо-восточную ориентировку и сопровождаются тектонитами с признаками сдвигового пластического течения. Среди минералов объектами исследования являются цирконы из щелочных сиенитов Западного участка Ульменского рудного поля.

Методы: Изучение состава горных пород проведено методом индуктивно-связанной плазмы на спектрометре OPTIMA 4300 в Лаборатории Всероссийского научно-исследовательского геологического института (г. Санкт-Петербург). Определение абсолютного возраста пород выполнено U-Pb методом с помощью ионного микрозонда SHRIMP-II по циркону.

Результаты. Абсолютный возраст сиенитов Сия-Ушпинского междуречья составляет 501 ± 4 млн лет, что соответствует концу среднего кембрия. Получены данные о вещественном составе сиенитов и монцонитов района Большого Личима, Ушпы, Ульмени, Верхнего Каракана, Салазана в пределах Сия-Ушпинского междуречья. Установлена последовательность их образования с выделением трех фаз: 1 фаза — монцониты, 2 фаза — сиениты, 3 фаза — щелочные сиениты. Состав монцонитов и сиенитов соответствует шошонитовой серии пород. Высокие отношения Nb/Ta (от 19,0 до 31,4) и Zr/Hf (от 30,4 до 60,6) в сиенитоидах и монцонитах Сия-Ушпинского междуречья свидетельствуют о вовлечении в плавление материала нижней коры. Относительно низкие концентрации Ni (от 2,3 до 4,1 г/т), Cr (от 1,0 до 3,2 г/т) и MgO (от 0,27 до 1,39 %) в сиенитах и монцонитах указывают на то, что они не могли быть продуктом прямого плавления мантийной магмы и результатом фракционирования мафических минералов из эволюционированного расплава. Следовательно, генерация сиенитов и монцонитов Сия-Ушпинского междуречья происходила по сценарию, в котором основная роль отводится расплавам, сформированным в результате частичного плавления материала нижней утолщённой коры. На экспериментальных диаграммах, позволяющих реставрировать источник плавления для магматических пород, составы сиенитоидов и монцонитов Сия-Ушпинского междуречья попадают, или близко тяготеют к полям плавления амфиболитов и граувакк. В изучаемых породах выявлен тетрад-эффект М-типа в спектре распределения редкоземельных элементов, что указывает на их насыщение флюидами, среди которых важная роль принадлежала CO₂ и H₂O. Последние имели ключевое значение для перемещения и концентрации золота. Авторская диаграмма Au – TE_{1,3} показывает тренд повышения содержания золота

при возрастании значений тетрад-эффекта М-типа в спектре распределения редкоземельных элементов. Пространственно с областью распространения сиенитов и монцонитов связаны многочисленные проявления золота, золотоносные россыпи, а также Ульменское золото-медно-скарновое месторождение. На последнем наиболее богатое оруденение тяготеет к дайкам сиенитов.

Ключевые слова:

щелочный магматизм, сиениты, монцониты, петрология, циркон, тетрад-эффект фракционирования редкоземельных элементов, золото, Горный Алтай.

Введение

Ненасыщенные кремнием плутонические комплексы являются одной из загадочных групп щелочных пород. Происхождение калиевого магматизма обсуждается уже многие годы [1, 2, 3, 4, 5]. Его продукты встречаются в различных геодинамических обстановках. Главным образом щелочные изверженные породы тяготеют к тектоническим обстановкам растяжения, таким как пост-орогенные, или внутриплитные [6, 7, 8], плюмовые обстановки крупных изверженных провинций [9, 10], а также к районам субдукции [11, 12]. Пространственный анализ ГИС на основе глобальной геохимической базы данных GEOROC также подтверждает приуроченность кайнозойских щелочных пород к границам плит или к горячим точкам, связанным с мантией и плюмом [13]. Значимость изучения продуктов калиевого магматизма определяется тем, что они используются для подтверждения мантийно-корового взаимодействия и характера эволюции континентальной коры [14, 15, 16].

Предложено несколько моделей происхождения щелочных пород и характера магматических процессов, которые включают: 1 – остаточные расплавы, образованные в результате фракционной кристаллизации щелочных базальтовых магм [16, 17]; 2 – расплавы, сформированные низкой степенью частичного плавления метасоматизированной мантии [5, 11, 14, 18, 19, 20, 21]; 3 – расплавы, образовавшиеся благодаря частичному плавлению коровых материалов в условиях давлений, типичных для основания утолщённой земной коры в закрытой системе [22, 23], или в связи с притоком летучих компонентов [15, 24]; 4 – смесь коровой анатектической гранитной и мантийно-производной мафической магм, сопровождающаяся последующей кристалл-дифференциацией [1, 3, 25]. Однако согласие в объяснении процессов становления и генезиса калиевых магм так и не достигнуто [4, 26, 27, 28].

Как правило, сиениты и монцониты формируются в несколько стадий, образуя сложные комплексы и серии пород. Так, на территории Центральной Камчатки сформировалась калиевая вулкано-плутоническая серия пород, которая варьируется от монцогаббро- и монцодиорита до монцонита и сиенит-порфира, за которой следует второй магматический цикл трахитовых сиенит-порфиров и, возможно, других более дифференцированных монцонитовых фаз [20].

По особенностям химического состава сиенитоиды близки к шошонитовой серии [20]. Более высокое содержание K, LILE и несовместимых элементов в шошонитовых магмах по сравнению с известково-щелочными обусловлено более низкой степенью плавления [12]. Для высококалиевых магматических пород, переходных к шошонитам, характерны высокие средние значения K_2O/Na_2O и высокие средние отношения Ce/Yb [19].

Металлогенический профиль сиенитоидов преимущественно золоторудный. Пространственно и парагенетически с сиенитами связано золото-сульфидно-кварцевое, золото-джаспероидное оруденение в Юхтино-Пуриканской рудной зоне Якутии (месторождения Самолазовское, Гарбузовское, Томмотское и проявление Аномальное) [29]. Кроме того, со щелочными комплексами связаны порфировые Cu-Au системы –

месторождения Рябиновое (Алдан) [30], Кирганикское (Камчатка) [20, 30], крупнейшее месторождение меди Юлонг (Китай) [31] и многие другие золоторудные объекты, а также эпитермальное золотое оруденение. Примером последнего является месторождение Ладолам на острове Лихир (Папуа-Новая Гвинея) – одно из крупнейших эпитермальных месторождений золота, обнаруженных в настоящее время [19].

Отмечается важная роль летучих компонентов в контроле золотого оруденения. Так, в районе месторождения Ладолам установлено особенно высокое содержание хлора в слюдах (флогопите и биотите) до 0,15 мас.%, а также высокое значение летучести кислорода (fO_2) в щелочных породах. Предполагается, что комплексообразование хлоридов в значительной степени контролировало содержание Au и Cu в водных флюидах, ответственных за гидротермальную минерализацию золота в Ладоламе [19]. На основе результатов исследований крупнейшего в Китае месторождения золота Дунпин, связанного с интрузиями сиенитов, предлагается использование цирконов в качестве индикаторов источников флюидов и рудогенеза в многоступенчатой гидротермальной системе [32]. Месторождение Дунпин расположено на северной окраине Северо-Китайского кратона и сформировалось в результате двух этапов минерализации – среднедевонской (~ 380 млн лет) и раннемеловой (~ 140 млн лет). Девонские гидротермальные цирконы, извлеченные из золотоносных кварцевых жил, образовались в результате метасоматических изменений магматических цирконов под действием богатого фтором флюида, что позволяет предполагать его магматическую природу наряду с аутометасоматическими процессами при кристаллизации сиенитов Шуйцюаньгоу, тогда как на меловом этапе золотой минерализации вовлекался флюид, выделившийся из щелочного плутона Шаншуйцюань. Золотая минерализация первой стадии характеризуется высоким содержанием золота (> 10 г/т), второй стадии — более низкими содержаниями (< 10 г/т) [33].

В Горном Алтае сиениты и монциты встречаются в составе Бабырганского и Айского массивов одноименного комплекса раннего триаса, с которыми связаны грейзеновые проявления олова, а также в еландинском монцитодирит-габбровом комплексе среднего кембрия [34]. В Салаире монциты и сиениты присутствуют в жерновском монцит-граносиенит-гранит-лейкогранитовом комплексе, с которыми парагенетически связаны медно-молибденовые проявления [35].

В северо-восточной части Горного Алтая на стыке горно-алтайских, горно-шорских и салаирских структур сформировался аномальный тектонический блок, в котором главные разломы имеют северо-восточную ориентировку, сопровождаемые тектонитами с признаками сдвигового пластического течения. В этом тектоническом блоке проявлены сиенитоиды и монциты, входящие в состав ульменского пироксенит-сиенит-монцит-габбрового комплекса среднего кембрия (рис. 1).

К области распространения сиенитов Сия-Ушпинского междуречья пространственно тяготеют месторождения и проявления золото-медно-скарнового, золото-сульфидно-кварцевого геолого-промышленных типов, а также промышленные россыпи золота по рекам Ульмень, Ушпа, Салазан и Сия. По некоторым из них в настоящее время проводится добыча россыпного золота.

Для определения закономерностей формирования золотого оруденения, распространенного в Сия-Ушпинском междуречье, необходимо изучение петрологии и геохимии щелочных пород – сиенитов и монцитов, а также уточнение их абсолютного возраста.

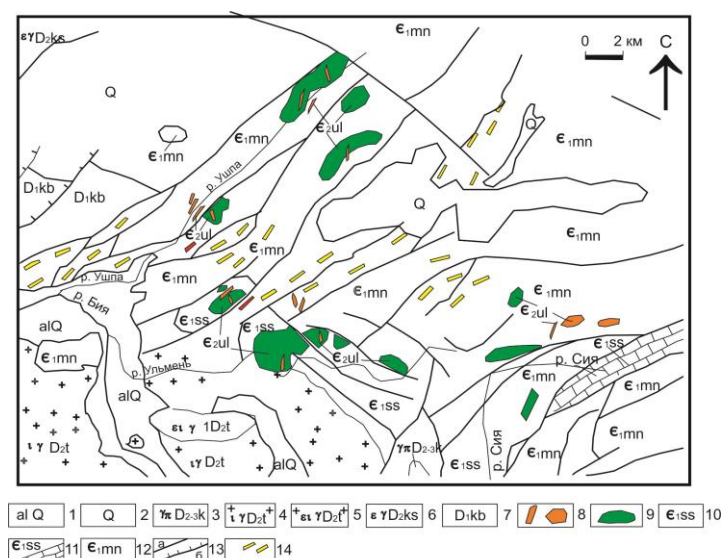


Рис. 1. Геологическое строение Сия-Ушпинского междуречья

1 – аллювиальные образования квартера; 2 – неразделённые образования квартера; 3 – гранит-порфиры кызылташского комплекса; турочакский комплекс: 4 – лейкограниты, 5 – сиено-лейкограниты; 6 – сиенограниты кистальского комплекса; 7 – пестроцветные песчаники, алевролиты, конгломераты кубойской свиты; ульменский комплекс: 8 – малые интрузии и дайки сиенитов, 9 – габбро и пироксениты; сиинская свита: 10 – песчаники и алевролиты, 11 – известняки и мраморы; 12 – алевролиты, туфы, сланцы, базальты манжерокской свиты; 13 – разломы: а – сложной кинематики, б – надвиги; 14 – тектониты.

Fig. 1. Schematic map of geological structure of Sija-Ushpa interfluvium

1 – alluvial deposits of quarter; 2 – undivided deposits of the quarter; 3 – granite-porphyrus of the Kyzyltash complex; Turochak complex: 4 – leucogranites, 5 – sieno-leucogranites; 6 – sienogranites of the Kistal complex; 7 – particolored sandstones, aleurolites, conglomerates of the Kuboy suite; Ulmen complex: 8 – dikes and small intrusions of syenites, 9 – gabbro and pyroxenites; Sija suite: 10 – aleurolites and sandstones, 11 – limestones and marbles; 12 – aleurolites, tuffs, slates, basalts of the Manzherok suite; 13 – faults: a – complex kinematics, b – thrusts; 14 – tectonites.

Материалы и методы исследования

Полевое изучение взаимоотношений сиенитов и монцонитов проведено в районе Большого Личима, Ушпы, Ульмени, Верхнего Каракана, Салазана в пределах Сия-Ушпинского междуречья. Отобраны пробы на силикатный и микроэлементный анализы из сиенитов (Большой Личим, Ульмень, Верхний Каракан, Салазан), щелочных сиенитов (Большой Личим, Ульмень), кварцевых монцонитов (Ушпа), монцонитов (Верхний Каракан). Проба для определения абсолютного возраста отобрана из самостоятельного небольшого тела щелочных сиенитов Западного участка Ульменского рудного поля (рис. 2). Анализы выполнены с использованием стандартных методик в Лаборатории Всероссийского научно-исследовательского геологического института (г. Санкт-Петербург): содержание элементов определено методом индуктивно-связанной плазмы на спектрометре OPTIMA 4300, абсолютное датирование щелочных сиенитов проведено U-Pb методом с помощью ионного микрозонда SHRIMP-II по циркону.

Геохимические данные интерпретировались с помощью комплекса диаграмм – ТАС-диаграммы по [36]; SiO₂ – A.R. по [37]; K₂O – SiO₂; диаграмм состава

экспериментальных расплавов из плавления фельзических пелитов (мусковитовых сланцев), метаграувакк и амфиболитов [38]; авторской диаграммы Au – TE_{1,3}. Тетрад-эффект фракционирования редкоземельных элементов TE_{1,3} рассчитан по методике В. Ирбер [39]. Значения редкоземельных элементов нормированы относительно хондрита [40].

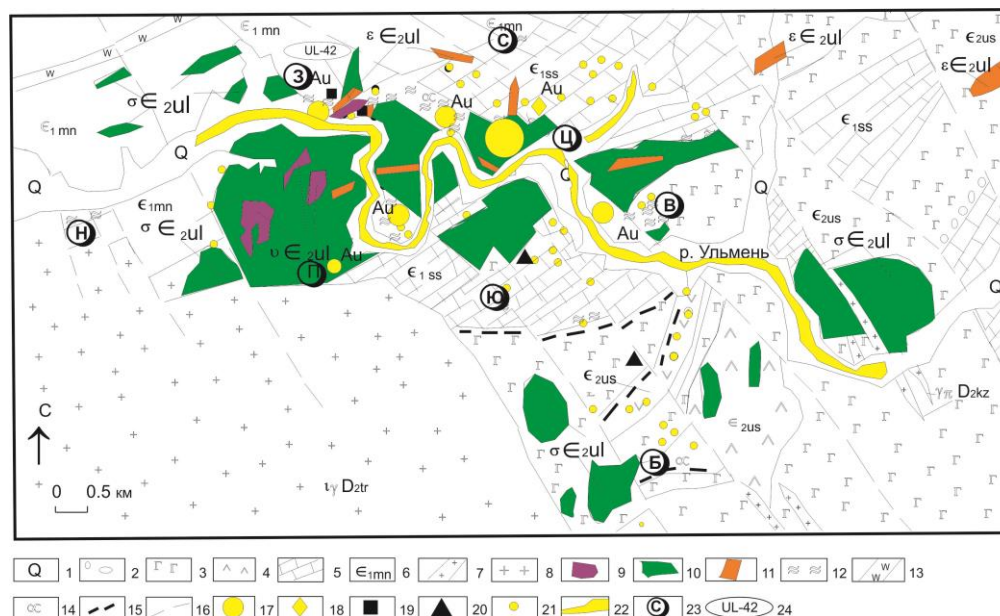


Рис. 2. Схема геологического строения и золотоносность Ульменского рудного поля (составлена А.И. Гусевым с учётом материалов Ю. Тверитинова)

1 – современные аллювиальные образования; усть-семинская свита: 2 – конгломераты; 3 – лавы, туфы базальтов и трахибазальтов; 4 – лавы и туфы андезитов, трахиандезитов; 5 – известняки и мраморы сиинской свиты; 6 – алевролиты, сланцы, туфы, базальты манжерокской свиты; 7 – гранит-порфиры кызылташского комплекса; 8 – граниты и лейкограниты турочакского комплекса; ульменский комплекс: 9 – пироксениты, габбро-пироксениты I фазы; 10 – габбро II фазы; 11 – монзониты, кварцевые щелочные сиениты и сиениты III фазы; 12 – скарны; 13 – кварциты; 14 – зоны лимонитизации; 15 – зоны рассланцевания; 16 – разломы; 17 – золото-медно-скарновые руды; 18 – золото-сульфидно-кварцевые проявления; 19 – «железные шляпы» и лимонитовые «сухари»; 20 – проявления магнетита; 21 – находки золота в шлихах; 22 – россыпи золота; 23 – золотоносные участки рудного поля: Ц – Центральный, В – Восточный, З – Западный, К – Каменный, Ю – Южный, С – Северный, П – Первый, Н – Нижний, Б – Берёзовско-Макарьевский; 24 – место отбора пробы для определения абсолютного возраста сиенитов.

Fig. 2. Schematic map of geological structure and auriferous of Ulmen ore field (created by A.I. Gusev taking into account the materials of Y. Tveritinov)

1 – modern alluvial deposits; ust-semin suite: 2 – conglomerates; 3 – lavas, tuffs of basalts and trachybasalts; 4 – lavas and tuffs of andesites, trachyandesites; 5 – limestones and marbles of the Siinsky suite; 6 – siltstones, tuffs, shales, basalts of the Manzherok suite; 7 – granite-porphyry of the Kyzyltash complex; 8 – granites, leucogranites of the Turochak complex; Ulmensky complex: 9 – pyroxenites, gabbro-pyroxenites of the first phase; 10 – gabbro of the second phase; 11 – monzonites, quartz alkaline syenites and syenites of the third phase; 12 – skarns; 13 – quartzite; 14 – zones of limonitization; 15 – zones of foliation; 16 – faults; 17 – gold-copper-skarn ores; 18 – gold-sulfide-quartz manifestations; 19 – gossan; 20 – manifestation of magnetite; 21 – finds of gold in concentrates; 22 – placers of gold; 23 – gold-bearing areas of the ore field: Ц – Central; В – Eastern; З – Western; К – Rock; Ю –

Southern; C – Northern; П – First; Н – Lower; Б – Berezovsko-Makaryevsky; 24 – sampling point for absolute determination of the age of syenites.

Абсолютная датировка сиенитов

Цирконы темно-коричневого цвета, прозрачные, полупрозрачные и мутные. Представлены идиоморфными кристаллами короткопризматического облика и их обломками. Длина зерен 100–250 мкм, коэффициент удлинения от 1 до 2. В катодоллюминесценции кристаллы и их обломки слабого свечения двухфазного строения: более светлая центральная часть с элементами секториальной зональности и темная краевая. Все точки измерений относятся к центральным частям циркона.

Содержание в цирконе (ppm): U=446 – 8412, Th=176 – 8307, Th/U=0,27 – 1,02. По результатам U-Pb датирования для цирконов построена дискордия с верхним пересечением 504 ± 7 млн лет. Из них для 8 анализов (8.1, 11.1, 3.1, 1.1, 6.1, 2.1, 4.1, 7.1) получен конкордантный возраст 501 ± 4 млн лет. Изотопный состав Pb, U, Th в цирконах сиенитов и абсолютные возраста замеров приведены в табл. 1.

Таблица 1. Абсолютные возраста и изотопный состав Pb, U, Th в цирконах сиенитов Ульменского рудного поля

Table 1. Absolute ages and isotopic composition of Pb, U, Th in zircons of syenites of Ulmen ore field

Точки замеров Test points	^{206}Pb с %	U, г/т ppm	Th, г/т ppm	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ Возраст, млн лет Age, Ma	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ Возраст Age, Ma	$\frac{^{238}\text{U}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$
5.1	0,17	1426	560	0,41	453 ± 8	527 ± 20	13,7	0,0579	0,58	0,073
12.1	0,04	1120	471	0,43	468 ± 6	516 ± 21	13,3	0,0576	0,60	0,075
10.1	0,01	2049	602	0,3	475 ± 6	510 ± 14	13,1	0,0575	0,61	0,076
8.1	-	1216	616	0,52	482 ± 7	507 ± 19	12,9	0,0574	0,61	0,078
11.1	0,04	1361	355	0,27	494 ± 4	503 ± 17	12,5	0,0573	0,63	0,080
3.1	0,02	2589	558	0,34	499 ± 4	506 ± 12	12,4	0,0574	0,64	0,080
1.1	-	446	176	0,41	505 ± 4	527 ± 30	12,3	0,0579	0,65	0,081
6.1	0,05	3249	2177	0,69	508 ± 6	496 ± 11	12,2	0,0571	0,65	0,082
2.1	1,28	2283	1797	0,81	514 ± 9	547 ± 47	12,0	0,0584	0,67	0,083
4.1	0,40	2413	2039	0,87	515 ± 8	515 ± 17	12,0	0,0576	0,66	0,083
7.1	0,91	2969	1315	0,46	515 ± 14	507 ± 22	12,0	0,0574	0,66	0,083
9.1	0,14	8412	5307	1,02	563 ± 9	486 ± 8	11,0	0,0569	0,72	0,091

Примечание. Ошибки равны 1-сигма. Pb_c – обычная часть свинца, Pb^* – радиогенная часть свинца. Общий Pb скорректирован с помощью измеренного изотопа ^{204}Pb .

Note. Errors are equal to 1-sigma; Pb_c – common part of lead, Pb^* – radiogenic part of lead. Total Pb is corrected using measured ^{204}Pb isotope.

Возраст кристаллизации сиенитов среднекембрийский, близкий к границе с поздним кембрием.

Петро-геохимия породных типов

Сиенитоидная группа пород ульменского комплекса представлена монцонитами, кварцевыми монцонитами, сиенитами и псевдолейцитовыми сиенитами. Они встречаются как самостоятельные дайки и входят в состав малых интрузивных тел. При этом псевдолейцитовые сиениты в сложных телах встречаются в центральных частях совместно с монцонитами среди сиенитов в виде небольших фрагментов 2×3 м.

Явно видно, что это дроблённые фазы, изменённые в приконтактных частях, что указывает на более раннее формирование щелочных разностей. Монцониты и кварцевые монцониты в таких телах присутствуют в виде ксенолитовых тел среди сиенитов, обычно в центральных частях. Это указывает на то, что монцонитоиды образуют более раннюю фазу внедрения, подвергшуюся дроблению после кристаллизации. Таким образом, можно выделить следующие интрузивные фазы: 1) монцониты, 2) сиениты, 3) щелочные сиениты.

Монцониты представляют собой крупнокристаллические породы серой окраски. Они более крупнокристаллические, чем сиенитоиды. Состав (%): зональный кали-натровый полевой шпат (30–32), роговая обманка ($f=51-59$) (2–3), клинопироксен (6–8), биотит (4–5), плагиоклаз (36–41), который по составу отвечает номерам 32–46. Аксессуары: магнетит, апатит, циркон, сульфиды, сфен, пренит, турмалин. В краевых частях зонального кали-натрового полевого шпата присутствуют микровключения салита, биотита, плагиоклаза. Биотит по составу соответствует сидерофиллиту. Темноцветные минералы местами замещены эпидотом и хлоритом.

В кварцевых монцонитах появляется кварц в количестве 2–3 %.

Сиениты – светло-серые с розоватым оттенком и светло-красные породы, мелкозернистые. Микроструктура гипидиоморфнозернистая. Минеральный состав (%): микроклин-пертит – 75–80, плагиоклаз – 7–10, роговая обманка – 5–9, кварц – 1–2, эпидот – 1–2, апатит, циркон, сфен, сульфиды – единичные зёрна. Преобладающий микроклин-пертит формирует изометричные зёрна, редко – крупные призматические выделения, имеющие зональное строение. В ядре таких кристаллов отмечается более интенсивная пелитизация. Плагиоклаз наблюдается в виде таблитчатых выделений и относится к альбит-олигоклазу с №№ 8–18. Обыкновенная роговая обманка окрашена в зеленовато-синеватые оттенки, ксеноморфна и часто замещается эпидотом и хлоритом.

Щелочные сиениты чаще всего имеют серо-розовую и красновато-розоватую окраску, средне-кристаллическое сложение. Микроструктура гипидиоморфнозернистая и микроклин-пертитовая. Состав (%): озаннит – 6–10, роговая обманка обыкновенная – 4–7, эпидот – 2–3, плагиоклаз – 10–15, микроклин – 75–80. Акцессорные минералы: циркон, апатит, сфен, сульфиды, ортит, пренит – единичные зёрна. Озаннит образует овоидные выделения размерами до 1 см, создавая порфириовидную структуру. Обыкновенная роговая обманка образует скопления мелких зёрен с отчётливым плеохроизмом от желтовато-зеленоватого до зеленовато-синего. Замещается эпидотом и хлоритом. Плагиоклаз определён олигоклазом № 10–12, местами сильно пелитизирован. Микроклин-пертит наблюдается в виде крупных изометричных выделений, нередко имеющих зональное строение. В центре их локализуется плагиоклаз (альбит), на который нарастает микроклин-пертит. Изредка отмечаются миароловые пустотки, инкрустированные по краям таблитчатыми кристалликами полевого шпата, эпидота и пренита.

Химический состав пород приведен в табл. 2.

Таблица 2. Химический состав сиенитов и монцонитов ульменского комплекса

Table 2. Chemical composition of syenites and monzonites of the Ul'men complex

Компоненты Components	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	60,7	61,1	61,6	58,91	60,2	59,9	62,6	56,9	59,1	56,1	61,1
TiO ₂	0,24	0,22	0,07	0,51	0,38	0,23	0,07	1,04	0,26	0,65	0,41
Al ₂ O ₃	19,0	18,97	18,8	18,65	17,8	19,2	18,0	18,15	17,84	17,3	18,22
Fe ₂ O ₃	2,18	1,95	2,84	3,17	2,3	1,75	0,72	4,2	3,79	4,26	3,97
FeO	3,67	0,79	2,32	1,66	2,1	1,1	0,73	3,0	3,1	3,45	2,11
MnO	0,09	0,03	0,26	0,09	0,09	0,08	0,05	0,09	0,26	0,15	0,21

MgO	0,58	0,27	0,57	1,11	1,14	0,91	0,69	1,39	0,8	0,86	0,95
CaO	0,25	1,66	0,16	5,18	2,81	3,43	1,55	1,32	0,49	3,6	1,13
Na ₂ O	4,64	1,45	4,03	4,7	5,7	3,07	2,92	5,5	6,34	3,3	4,1
K ₂ O	6,84	12,7	7,93	4,8	6,03	8,72	11,6	4,1	5,55	3,8	7,25
P ₂ O ₅	0,14	0,02	0,15	0,24	0,4	0,06	0,05	0,75	0,31	0,45	0,15
П.п.п. LOI	1,38	0,63	1,36	1,19	0,66	0,86	0,76	1,79	1,74	1,4	0,35
Сумма Sum	100,3	99,84	100,3	99,7	99,4	99,5	99,8	98,5	99,5	99,84	99,95
Li	2,53	2,5	2,4	3,1	2,7	2,49	2,56	3,0	2,5	2,3	3,3
Be	4,76	4,7	4,7	5,2	4,2	4,9	4,74	5,1	4,4	4,0	4,5
Sc	4,52	4,4	4,2	5,8	6,7	4,5	4,39	5,4	6,5	5,8	6,7
V	50,5	55	52	56,5	61	51,7	53	49,8	60,5	62,9	58,5
Cr	1,51	1,2	1,3	2,6	3,2	1,4	1,0	2,5	3,0	2,7	2,2
Co	1,8	1,86	1,8	2,2	3,0	1,78	1,83	2,1	2,9	3,9	1,9
Ni	2,52	2,45	2,3	2,8	2,6	2,5	2,41	2,7	2,7	4,1	2,5
Cu	90,4	87,1	88,7	89,2	94,6	88,4	87,8	90,2	95,1	94,2	91,5
Zn	28,4	27,1	27,0	30,1	31,4	27,1	26,3	29,3	32,7	31,8	35,7
Ag	0,33	0,29	0,3	0,38	0,45	0,3	0,27	0,4	0,51	0,42	0,56
Au	163	160	166	255	230	152	154	225	242	161	233
Sb	0,42	0,39	0,42	0,48	0,54	0,4	0,36	0,43	0,47	0,32	0,4
Ga	22,8	21,4	21,4	22,1	21,6	21,7	20,7	23,2	21,1	24,2	22,5
Rb	165	141	144	154	193	148	138	156	190	178	184
Sr	254	261	272	278	302	273	263	282	306	311	296
Y	36,8	36,1	39,2	38,5	40,3	38,9	36,5	37,9	29,6	44,8	41,4
Zr	342	348	342	338	345	347	351	341	321	289	346
Nb	15,5	14,8	15,2	15,7	16,0	15,0	14,9	16,2	15,7	15,8	16,7
Sn	0,31	0,81	0,85	0,9	1,1	0,88	0,84	0,92	0,96	0,42	1,2
Cs	0,73	0,40	0,44	0,8	0,5	0,45	0,42	0,78	0,53	0,28	0,7
Ba	305	286	295	345	486	290	283	352	316	332	405
La	98,5	97,1	99,5	50,1	46,0	98,6	96,7	53,1	55,1	110,5	46,5
Ce	141,1	142	141,6	80,3	78,5	140,6	141	81,4	90,4	151,5	80,1
Pr	12,7	12,0	12,3	2,0	1,8	12,0	11,9	2,9	2,5	15,1	1,9
Nd	39,5	37,7	38,8	20,2	19,1	38,1	37,6	21,3	23,7	43,2	19,4
Sm	5,8	5,42	5,4	3,3	2,8	5,5	5,43	3,6	3,1	7,3	2,9
Eu	0,7	0,66	0,67	0,55	0,51	0,66	0,68	0,56	0,6	0,89	0,5
Gd	5,8	5,4	5,8	4,9	3,9	5,6	5,38	5,1	4,2	7,1	4,0
Tb	0,84	0,77	0,82	0,8	0,75	0,8	0,76	0,82	0,8	0,84	0,74
Dy	4,6	4,5	4,57	4,4	4,2	4,55	4,48	4,5	4,7	6,1	4,3
Ho	1,2	1,0	1,15	1,2	1,1	1,1	1,02	1,15	1,2	1,45	1,06
Er	3,7	3,3	3,66	4,5	4,2	3,6	3,29	4,55	4,1	4,7	4,3
Tm	0,7	0,66	0,63	0,6	0,52	0,65	0,62	0,62	0,6	1,1	0,6
Yb	5,0	4,7	4,8	4,9	4,6	4,7	4,62	5,1	4,8	9,0	4,7
Lu	0,88	0,85	0,82	0,4	0,39	0,8	0,82	0,42	0,5	1,45	0,42
Hf	9,0	8,7	8,8	6,4	6,0	8,7	8,68	6,5	5,3	9,5	6,4
Ta	0,76	0,7	0,73	0,55	0,52	0,71	0,72	0,58	0,5	0,83	0,55
Pb	8,5	7,6	9,2	8,2	7,3	8,2	7,56	9,3	6,3	9,6	9,6
W	0,65	0,52	0,58	0,98	1,3	0,6	<0,5	0,88	1,4	0,65	1,1
Th	45,8	46,1	48,9	35,1	35,9	48,2	45,7	36,3	31,6	27,4	34,6
U	10,3	10,3	11,3	10,9	11,3	11,4	10,1	11,6	9,7	8,5	11,4
ΣREE	357,8	347,2	359,7	216,6	208,7	356,2	350,8	223,0	225,9	405,0	212,5
TE _{1,3}	0,88	0,92	0,88	0,7	0,75	0,89	0,92	0,76	0,77	0,87	0,76
Eu/Eu*	0,37	0,37	0,37	0,42	0,48	0,36	0,38	0,41	0,51	0,38	0,45

(La/Yb) _N	13,02	13,6	13,4	6,7	6,6	13,8	18,6	6,9	7,6	8,1	6,5
Nb/Ta	20,4	21,1	20,8	28,5	30,8	21,1	20,7	27,9	31,4	19,0	30,4
Zr/Hf	38,0	40,0	38,9	52,8	57,5	39,9	40,4	52,5	60,6	30,4	54,0

Примечание. П.п.п. – потери в процессе прокаливании. N – элементы, нормированные по [40]. Eu* рассчитан по формуле $(Sm_N + Gd_N)/2$. TE_{1,3} – тетрад-эффект фракционирования редкоземельных элементов. Рассчитан как среднее значение между первой и третьей тетрадами по [39]. Сиенитоиды: Большой Личим: 1,3 – сиениты; 2 – щелочной сиенит; Ушпа: 4 – кварцевый монзонит; Ульмень: 5–6 – сиениты, 7 – щелочной сиенит; Верхний Каракан: 8 – монзонит, 9 – сиенит, 10 – монзонит; Салазан: 11 – сиенит.

Footnote. LOI – loss on ignition. N – elements normalized according to [40]. $Eu^* = (Sm_N + Gd_N)/2$. TE_{1,3} – tetrad effect fractionation of rare earth elements is estimated as average between the first and third tetrads according to V. Irber [39]. Syenitoids: Big Lichim: 1,3 – syenites; 2 – alkaline syenite; Ushpa: 4 – quartz monzonite; Ulmen: 5–6 – syenites; 7 – alkaline syenite; Upper Karakan: 8 – monzonite, 9 – syenite, 10 – monzonite; Salazan: 11 – syenite.

На диаграмме ТАС по [36] сиениты и монзониты попадают в соответствующие поля (рис. 3, а/а). Щелочные сиениты на этой диаграмме попадают в поле фельдшпатоидных сиенитов, а на диаграмме A.R. – SiO₂ по [37] они локализуются в области пералкалиновых пород (рис. 3, б/б).

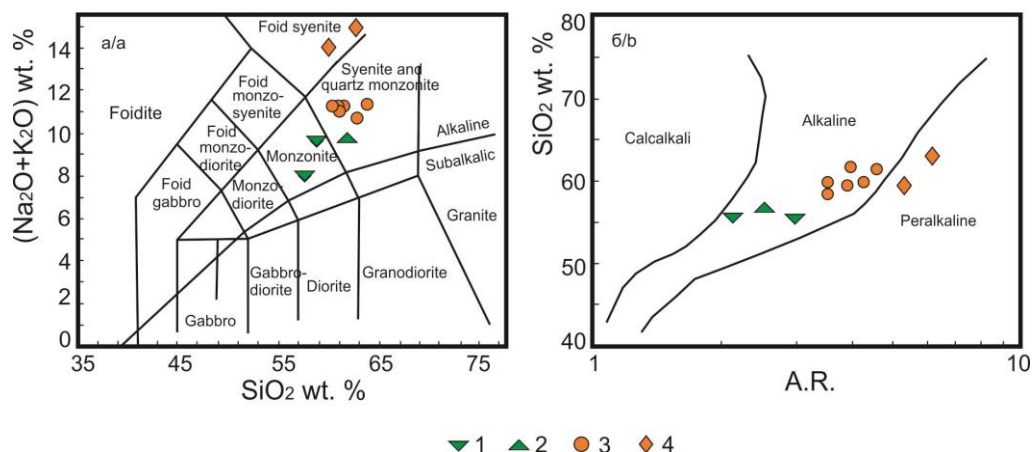


Рис. 3. Диаграммы: а/а – ТАС-диаграмма по [36] и б/б – SiO₂ – A.R. по [37] для сиенитов и монзонитов Сия-Ушпинского междуречья. Породы: 1 – монзониты, 2 – кварцевые монзониты, 3 – сиениты, 4 – щелочные сиениты. A.R. = $[Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O] / [Al_2O_3 + CaO - Na_2O - K_2O]$.

Fig. 3. Plots: а/а – TAS-plot [36] and б/б – SiO₂ – A.R. [37] for syenites and monzonites of the Sija-Ushcha interfluvium. Rocks: 1 – monzonites, 2 – quartz monzonites, 3 – syenites, 4 – alkaline syenites. A.R. = $[Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O] / [Al_2O_3 + CaO - Na_2O - K_2O]$.

Диаграмма K₂O – SiO₂ позволяет относить анализируемые породы к банакитам шошонитовой серии (рис. 4).

На спайдер-диаграмме просматриваются в целом согласованные кривые распределения редкоземельных элементов для всех типов пород. На этом фоне видны негативная европиевая аномалия, а также пониженные концентрации празеодима в некоторых пробах сиенитов (рис. 5). Отрицательная аномалия по европию во всех породных типах также подтверждается низкими отношениями Eu/Eu*, варьирующими от 0,36 до 0,51 (табл. 3).

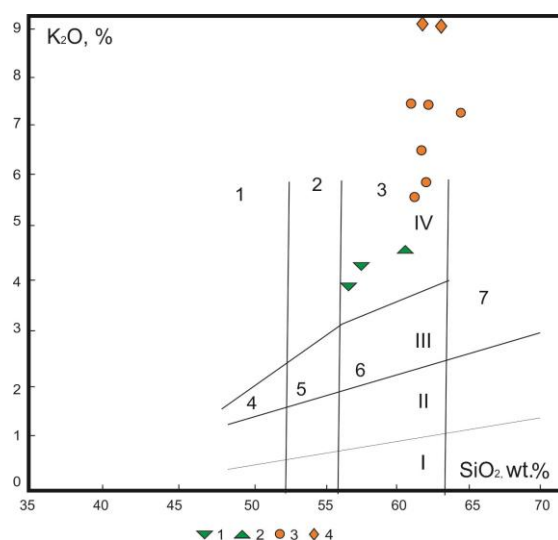


Рис. 4. Диаграмма K_2O –

SiO_2 для сиенитов и монзонитов Сия-Ушпинского междуречья. Поля пород: 1 – абсарокит; 2 – шшонит; 3 – банакит; 4 – высоко-калиевый базальт; 5 – высоко-калиевый андезибазальт; 6 – высоко-калиевый андезит; 7 – высоко-калиевый дацит по [41]. Серии пород: I – толеитовая; II – известково-щелочная; III – высоко-калиевая известково-щелочная; IV – шшонитовая. Условные обозначения на рис. 3.

Fig. 4. Plot K_2O – SiO_2 for syenites and monzonites of the Siya-Ushpa interfluve. Rock fields: 1 – absarokite; 2 – shoshonite; 3 – banakite; 4 – K-rich basalt; 5 – K-rich andesite basalt; 6 – K-rich andesite; 7 – K-rich dacite is presented according to [41]. Series of rocks: I – tholeiitic; II – calc-alkaline; III – K-rich calc-alkaline; 4 – shoshonite. Legend shown in Fig. 3.

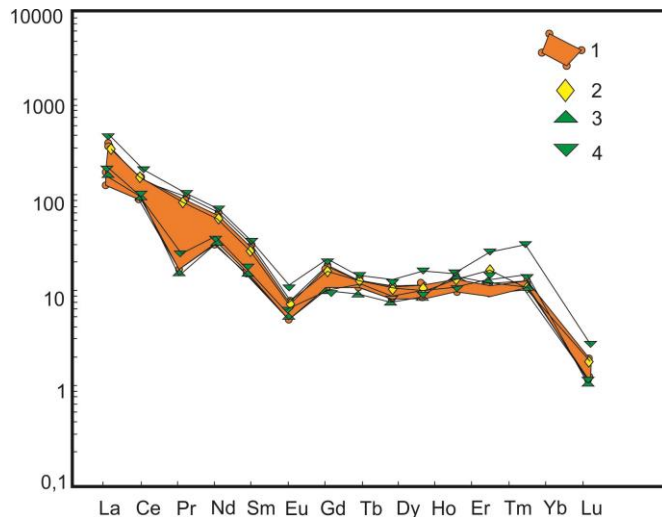


Рис. 5. Распределение РЗЭ в сиенитах и монзонитах Сия-Ушпинского междуречья. Значения нормированы относительно хондрита [40].

1 – обобщённый контур распределения РЗЭ в сиенитах; 2 – щелочные сиениты; 3 – кварцевые монзониты; 4 – монзониты.

Fig. 5. REE distribution in syenites and monzonites of the Siya-Ushpa interfluve.

Values are normalized to chondrite according to [40]. 1 – generalized outline of REE distribution in syenites; 2 – alkaline syenites; 3 – quartz monzonites; 4 – monzonites.

Интерпретация результатов

Высокие отношения Nb/Ta (от 19,0 до 31,4) и Zr/Hf (от 30,4 до 60,6) в сиенитоидах и монцонитах Сия-Ушпинского междуречья свидетельствуют о вовлечении в плавление материала нижней коры [42]. Относительно низкие концентрации Ni (от 2,3 до 4,1 г/т), Cr (от 1,0 до 3,2 г/т) и MgO (от 0,27 до 1,39 %) в сиенитах и монцонитах указывают на то, что они не могли быть продуктом прямого плавления мантийной магмы и результатом фракционирования мафических минералов из эволюционированного расплава [43, 44]. Следовательно, наиболее вероятно их образование за счёт плавления пород нижней коры.

Экспериментальные диаграммы, полученные в результате плавления разных типов пород земной коры, позволяют реставрировать источник плавления для магматических пород. На таких диаграммах отчётливо видно, что составы сиенитоидов и монцонитов Сия-Ушпинского междуречья попадают, или близко тяготеют к полям плавления амфиболитов и граувакк (рис. 6, а/а, б/б, с/с).

На диаграмме A/CNK – SiO₂ составы сиенитов и монцонитов тяготеют к средним составам сланцев Северной Америки и пост-архейским Австралийским осадочным породам (рис. 6, д/д).

Следовательно, генерация сиенитов и монцонитов Сия-Ушпинского междуречья происходила по сценарию, в котором основная роль отводится расплавам, сформированным в результате частичного плавления материала нижней утолщённой коры.

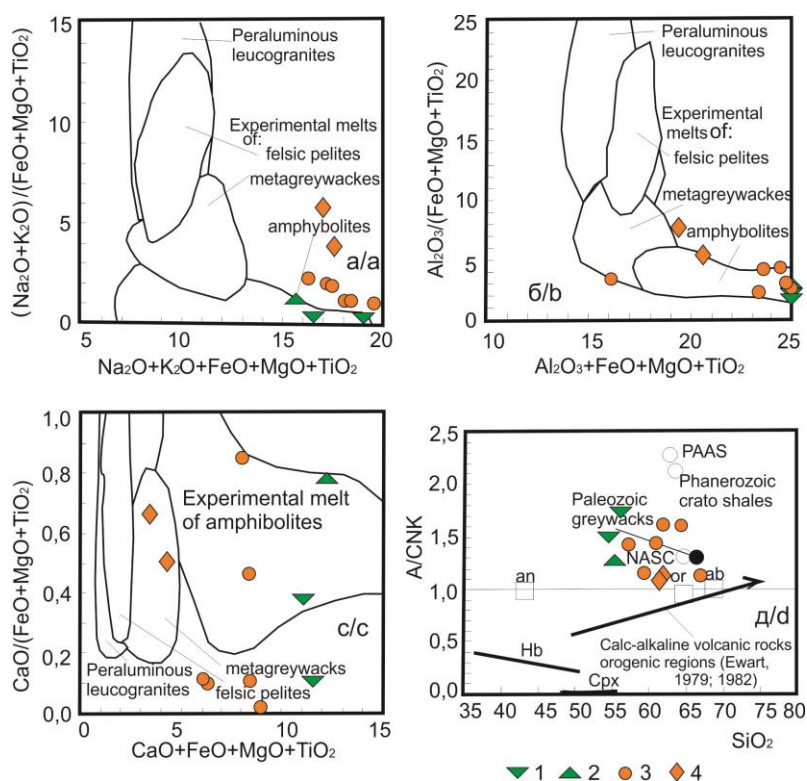


Рис. 6. Экспериментальные диаграммы: (а/а), (б/б), (с/с) – диаграммы состава экспериментальных расплавов из плавления фельзических пелитов (мусковитовых сланцев), метаграувакк и амфиболитов [38] для монцонитов и сиенитов Сия-Ушпинского междуречья; (д/д) – диаграмма A/CNK – SiO₂ для монцонитов и сиенитов Сия-Ушпинского междуречья. Тренд известково-щелочного фракционирования вулканических пород орогенных регионов показан по [45, 46]. А – Al₂O₃, CNK – сумма CaO, Na₂O, K₂O. NASC – сланцы Северной Америки; PAAS – средний состав пост-

архейских осадочных пород Австралии. Остальные условные обозначения показаны на рис. 3.

Fig. 6. Experimental plots: (a/a), (б/б), (с/с) – plots of composition experimental melts from melting felsic pelites (muscovite shales), metagreywack and amphibolite [38] for monzonites and syenites of the Siya-Ushpa interfluvium; (д/д) – plot $\text{SiO}_2 - \text{A/CNK}$ for monzonites and syenites of the Siya-Ushpa interfluvium. The trend of calc-alkaline fractionation of volcanic rocks of orogenic regions is presented according to [45, 46]. A – Al_2O_3 , CNK – sum CaO , Na_2O , K_2O . NASC – the composition of the shale of North America; PAAS – the average composition of post-Archean sedimentary rocks of Australia. Legend shown in Fig. 3.

Рудоносность сиенитоидов Сия-Ушпинского междуречья проявлена в том, что пространственно с областью распространения сиенитов и монзонитов связаны многочисленные проявления золота, золотоносные россыпи, а также Ульменское золото-медно-скарновое месторождение. На последнем наиболее богатое оруденение тяготеет к дайкам сиенитов. В таблице 3 видно, что содержания золота в породных типах имеют широкий диапазон величин – от 152 до 255 г/т, а тренд увеличения концентраций металла коррелируется с увеличением значений тетрад-эффекта М-типа в спектре распределения редкоземельных элементов (рис. 7).

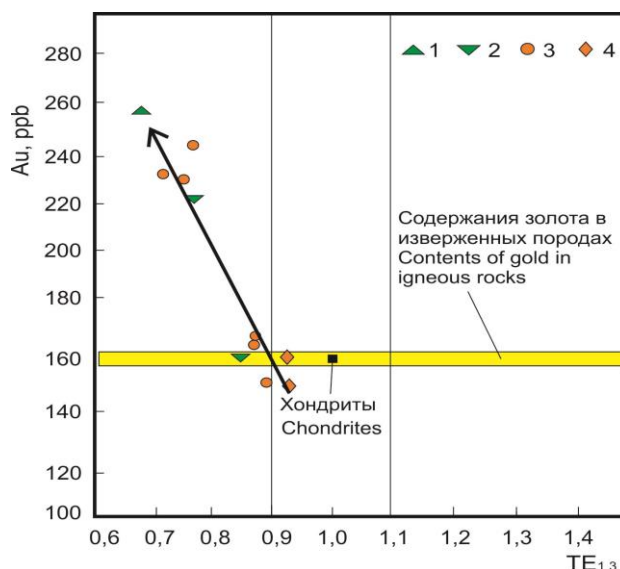


Рис. 7. Диаграмма Au – $\text{TE}_{1,3}$ для сиенитов и монзонитов Сия-Ушпинского междуречья (разработана А.И. Гусевым)

Содержания золота в изверженных породах приняты по [47]. Концентрации золота в хондритах приведены по [48]. Условные обозначения показаны на рис. 3.

Fig. 7. Plot Au – $\text{TE}_{1,3}$ for syenites and monzonites of the Siya-Ushpa interfluvium (created by A.I. Gusev).

The gold content in igneous rocks is taken according to [47]. Gold concentration in chondrites is shown according to [48]. Legend presented in Fig. 3.

Как известно, проявление тетрад-эффекта фракционирования редкоземельных элементов М-типа в интрузивных породах обусловлено активностью во флюидах таких летучих компонентов, как CO_2 и H_2O . Это позволяет предполагать, что перенос золота и других металлов из глубинного очага к местам рудолокализации происходил при участии магматогенных флюидов, обогащённых этими летучими компонентами.

Заключение

Сиениты Сия-Ушпинского междуречья имеют абсолютный возраст 501 ± 4 млн лет, отвечающий концу среднего кембрия. Химизм монцонитов и сиенитов уверенно диагностирует их принадлежность к шошонитовой серии пород. Их генезис связывается с частичным плавлением утолщённой нижней коры. Породы были насыщены флюидами, в которых важная роль принадлежала CO_2 и H_2O . Последние играли важнейшую роль в проявлении тетрад-эффекта фракционирования редкоземельных элементов и переносе золота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Pikes Peak batholith, Colorado front range, and a model for the origin of the gabbro–anorthosite–syenite–potassic granite suite / F. Barker, D.R. Wones, W.N. Sharp, G.A. Desborough // *Precambrian Research*. – 1975. – V. 2. – № 2. – P. 97–106, 108, 111–160.
2. Coulson I.M., Russell J.K., Dipple G.M. Origins of the Zippa Mountain pluton: a Late Triassic, arc-derived, ultrapotassic magma from the Canadian Cordillera // *Canadian Journal of Earth Sciences*. – 1999. – V. 36. – №9. – P. 1415–1434.
3. Petrogenesis of an Alkali Syenite-Granite-Rhyolite Suite in the Yanshan Fold and Thrust Belt, Eastern North China Craton: Geochronological, Geochemical and Nd-Sr-Hf Isotopic Evidence for Lithospheric Thinning / J.-H. Yang, F.-Y. Wu, S.A. Wilde, F. Chen, X.-M. Liu, L.-W. Xie // *Journal of Petrology*. – 2008. – V. 49. – № 2. – P. 315–351.
4. Trace elements and Sr–Nd–Pb isotopes of K-rich, shoshonitic, and calc-alkaline magmatism of the Western Mediterranean Region: Genesis of ultrapotassic to calc-alkaline magmatic associations in a post-collisional geodynamic setting / S. Conticelli, L. Guarnieri, A. Farinelli, M. Mattei, R. Avanzinelli, G. Bianchini, E. Boari, S. Tommasini, M. Tiepolo, D. Prelević, G. Venturelli // *Lithos*. – 2009. – V. 107. – №1–2. – P. 68–92.
5. Petrogenesis of silica-saturated and silica-undersaturated syenites in the northern North China Craton related to post-collisional and intraplate extension / J.-H. Yang, J.-F. Sun, M. Zhang, F.-Y. Wu, S.A. Wilde // *Chemical Geology*. – 2012. – V. 328. – P. 149–167.
6. Alkali-calcic and alkaline post-orogenic (PO) granite magmatism: petrologic constraints and geodynamic settings / B. Bonin, A. Azzouni-Sekkal, F. Bussy, S. Ferrag // *Lithos*. – 1998. – V. 45. – № 1–4. – P. 45–70.
7. Sylvester P.J. Post-Collisional Alkaline Granites // *The Journal of Geology*. – 1989. – V. 97. – № 3. – P. 261–280.
8. Whalen J.B., Currie K.L., Chappell B.W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1987. – V. 95. – P. 407–419.
9. Origin of Late Permian syenite and gabbro from the Panxi rift, SW China: The fractionation process of mafic magma in the inner zone of the Emeishan mantle plume / Z. Zhang, J. Qin, S. Lai, X. Long, Y. Ju, X. Wang, Y. Zhu, F. Zhang // *Lithos*. – 2019. – V. 346–347. – Article 105160.
10. Sources and settings of Ediacaran post-collisional syenite-monzonite-diorite shoshonitic magmatism from southernmost Brazil / D.F. Padilha, M.F. Bitencourt, L.V.S. Nardi, L.M. Florisbal, C. Reis, M. Geraldes, B.S. Almeida // *Lithos*. – 2019. – V. 344–345. – P. 482–503.

11. Yan X., Jiang Sh.-Y. Petrogenesis and tectonic implications of Early Cretaceous shoshonitic syenites in the northern Wuyi Mt Range, Southeast China // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2019. – V. 180. – Article 103877.
12. The formation of shoshonitic magma and its relationship to porphyry-type mineralisation: the Maronia pluton in NE Greece / A. Schaarschmidt, R. Klemm, M. Regelous, P.C. Voudouris, V. Melfos, K.M. Haase // *Lithos*. – 2021. – V. 380–381. – Article 105911.
13. Temporal-spatial analysis of alkaline rocks based on GEOROC / M. Zhang, C. Wang, Q. Zhang, Y. Qin, J. Shen, X. Hu, G. Zhou, S. Li // *Applied Geochemistry*. – 2021. – V. 124. – Article 104853.
14. Mg, Sr, and O isotope geochemistry of syenites from northwest Xinjiang, China: Tracing carbonate recycling during Tethyan oceanic subduction / S. Ke, F.-Z. Teng, S.-G. Li, T. Gao, S.-A. Liu, Y. He, X. Mo // *Chemical Geology*. – 2016. – V. 437. – P. 109–119.
15. Litvinovsky B.A., Jahn B.M., Eyal M. Mantle-derived sources of syenites from the A-type igneous suites – New approach to the provenance of alkaline silicic magmas // *Lithos*. – 2015. – V. 232. – P. 242–265.
16. Petrogenesis of coeval silica-saturated and silica-undersaturated alkaline rocks: Mineralogical and geochemical evidence from the Saima alkaline complex, NE China / Y.-S. Zhu, J.-H. Yang, J.-F. Sun, J.-H. Zhang, F.-Y. Wu // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2016. – V. 117. – P. 184–207.
17. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: geochronological, geochemical and Nd–Sr isotopic evidence / J.-H. Yang, S.-L. Chung, S.A. Wilde, F.-Y. Wu, M.-F. Chu, C.-H. Lo, H.-R. Fan // *Chemical Geology*. – 2005. – V. 214. – № 1–2. – P. 99–125.
18. Isotopic evidence for the origin of Cenozoic volcanic rocks in the Pinacate volcanic field, northwestern Mexico / D.J. Lynch, T.E. Musselman, J.T. Gutmann, P.J. Patchett // *Lithos*. – 1993. – V. 29. – № 3–4. – P. 295–302.
19. Potassic igneous rocks from the vicinity of epithermal gold mineralization, Lihir Island, Papua New Guinea / D. Müller, L. Franz, P.M. Herzig, S. Hunt // *Lithos*. – 2001. – V. 57. – Issues 2–3. – P. 163–186.
20. The Kirganik alkalic porphyry Cu-Au prospect in Kamchatka, Eastern Russia: A shoshonite-related, silica-undersaturated system in a Late Cretaceous island arc setting / S.G. Soloviev, S.G. Kryazhev, V.N. Shapovalenko, G.S. Collins, S.S. Dvurechenskaya, D.S. Bukhanova, A.I. Ezhov, K.I. Voskresensky // *Ore Geology Reviews*. – 2021 – V. 128. – Article 103893.
21. A metasomatized ¹⁸O-rich veined lithospheric mantle source for ultrapotassic magmas / W. Fan, N. Jiang, J. Hu, D. Liu, L. Zhao, T. Li // *Lithos*. – 2021. – V. 382–383. – Article 105964.
22. Dai F.-Q., Zhao Z.-F., Zheng Y.-F. Partial melting of the orogenic lower crust: Geochemical insights from post-collisional alkaline volcanics in the Dabie orogen // *Chemical Geology*. – 2017. – V. 454. – P. 25–43.
23. Late Triassic melting of a thickened crust in southeastern China: Evidence for flat-slab subduction of the Paleo-Pacific plate / K.-Y. Zhu, Z.-X. Li, X.-S. Xu, S.A. Wilde // *Journal of Asian Earth Sciences*. – 2013. – V. 74. – P. 265–279.
24. Huang W.-L., Wyllie P.J. Melting Reactions in the System NaAlSi₃O₈–KAlSi₃O₈–SiO₂ to 35 Kilobars, Dry and with Excess Water // *The Journal of Geology*. – 1975. – V. 83. – № 6. – P. 737–748.

25. Green core clinopyroxenes from Martin Vaz Archipelago Plio-Pleistocene alkaline rocks, South Atlantic Ocean, Brazil: A magma mixing and polybaric crystallization record / A.L. de Oliveira, A.C. dos Santos, C.C. Nogueira, T.M. Maia, M.C. Geraldès // *Journal of South American Earth Sciences*. – 2021. – V. 105. – Article 102951.
26. Potassic volcanic rocks and adakitic intrusions in southern Tibet: Insights into mantle-crust interaction and mass transfer from Indian plate / D. Liu, Z. Zhao, D.J. DePaolo, D.-C. Zhu, F.-Y. Meng, Q. Shi, Q. Wang // *Lithos*. – 2017. – V. 268–271. – P. 48–64.
27. Rukhlov A.S., Blinova A.I., Pawlowicz J.G. Geochemistry, mineralogy and petrology of the Eocene potassic magmatism from the Milk River area, southern Alberta, and Sweet Grass Hills, northern Montana // *Chemical Geology*. – 2013. – V. 353. – P. 280–302.
28. Dostal J., Shellnutt J.G., Church B.N. Petrogenesis of an Eocene syenitic intrusion from south-central British Columbia: Evidence for increasing influence of cratonic Laurentia on alkaline magmatism of western North America // *Lithos*. – 2019. – V. 332–333. – P. 67–82.
29. Дворник Г.П., Угрюмов А.Н., Балахонов В.С. Метасоматиты и золотоджаспероидное оруденение в контактовой зоне Аномального щелочного массива с вмещающими карбонатными породами // *Известия Уральского государственной горно-геологической академии. Серия: Геология и геофизика*. – 2003. – Вып. 18. – С. 105–109.
30. Гусев А.И. Золотоносные щелочные магматические комплексы // *Успехи современного естествознания*. – 2012. – № 9. – С. 47–52.
31. Yulong Deposit, Eastern Tibet: A High-Sulfidation Cu-Au Porphyry Copper Deposit in the Eastern Indo-Asian Collision Zone / Z. Hou, Y. Xie, W. Xu, Y. Li, X. Zhu, Z. Khin, G. Beaudoin, Z. Rui, W. Huang, C. Luobu // *International Geology Review*. – 2007. – V. 49. – Issue 3. – P. 235–258.
32. Zircon indicators of fluid sources and ore genesis in a multi-stage hydrothermal system: The Dongping Au deposit in North China / H. Li, J.-W. Li, T.J. Algeo, J.-H. Wu, M. Cisse // *Lithos*. – 2018. – V. 314–315. – P. 463–478.
33. Bao Z., Li C., Zhao Z. Metallogeny of the syenite-related Dongping gold deposit in the northern part of the North China Craton: A review and synthesis // *Ore Geology Reviews*. – 2016. – V. 73. – Part 2. – P. 198–210.
34. Корреляция магматических и метаморфических комплексов западной части Алтае-Саянской складчатой области [Текст, карты, разрезы, приложения] / С.П. Шокальский, Г.А. Бабин, А.Г. Владимиров и др. – Новосибирск, 2000. – 188 с.
35. Гусев А.И., Табакаева Е.М. Магматизм и металлогения Салаира. – Бийск: АГПУ им. В.М. Шукшина, 2017. – 182 с.
36. Middlemost E.A.K. Naming materials in the magma/igneous rock system // *Earth-Science Reviews*. – 1994. – V. 37. – № 3–4. – P. 215–224.
37. Wright J.B. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis // *Geological Magazine*. – 1969. – V. 106. – № 4. – P. 370–384.
38. Patiño Douce A.E. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? // *Geological Society, London, Special Publications*. – 1999. – V. 168. – P. 55–75.
39. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1999. – V. 63. – № 3–4. – P. 489–508.
40. Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements: Meteoritic and solar // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1989. – V. 53. – №1. – P. 197–214.

41. Peccerillo A., Taylor S.R. Rare earth elements in East Carpathian volcanic rocks // *Earth and Planetary Science Letters*. – 1976. – V. 32. – № 2. – P. 121–126.
42. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // *Treatise on Geochemistry, Volume 3: The Crust* / Edited by R. Rudnick. – Amsterdam: Elsevier, 2003. – P. 1-64.
43. Frost C.D., Frost B.R. Reduced rapakivi-type granites: The tholeiite connection // *Geology*. – 1997. – V. 25. – №7. – P. 647–650.
44. Trace elements and Sr-Nd isotopic geochemistry and genesis of Jijie alkaline-ultramafic rocks, southern part of Panxi rift / Z. Zhao, L. Qi, Z.L. Huang, Z.F. Yan, C. Xu // *Acta Petrologica Sinica*. – 2012. – № 6. – P. 1915–1927.
45. Ewart A. A review of the mineralogy and chemistry of Tertiary-Recent dacitic, latitic, rhyolitic, and related salic volcanic rocks // *Trondjemites, Dacites, and Related Rocks*. – Amsterdam: Elsevier, 1979. – P. 13-121.
46. Ewart A. The mineralogy and petrology of Tertiary – Recent orogenic volcanic rocks: with special reference to the andesitic-basaltic compositional range // *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. – Chichester, New York, Brisbane, Toronto, and Singapore: John Wiley and Sons, 1982. – P. 25–95.
47. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в горных породах // *Геохимия*. – 1962. – № 7. – С. 555–571.
48. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Compositions of chondrites // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 1988. – V. 325. – № 1587. – P. 535–544.

Поступила 06.01.2021 г.

REFERENCES

1. Barker F., Wones D.R., Sharp W.N., Desborough G.A. The Pikes Peak batholith, Colorado front range, and a model for the origin of the gabbro–anorthosite–syenite–potassic granite suite. *Precambrian Research*, 1975, vol. 2, no. 2, pp. 97–106, 108, 111–160. DOI: 10.1016/0301-9268(75)90001-7
2. Coulson I.M., Russell J.K., Dipple G.M. Origins of the Zippa Mountain pluton: a Late Triassic, arc-derived, ultrapotassic magma from the Canadian Cordillera. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1999, vol. 36, no. 9, pp. 1415–1434. DOI: 10.1139/e99-045
3. Yang J.-H., Wu F.-Y., Wilde S.A., Chen F., Liu X.-M., Xie L.-W. Petrogenesis of an Alkali Syenite-Granite-Rhyolite Suite in the Yanshan Fold and Thrust Belt, Eastern North China Craton: Geochronological, Geochemical and Nd-Sr-Hf Isotopic Evidence for Lithospheric Thinning. *Journal of Petrology*, 2008, vol. 49, no. 2, pp. 315–351. DOI: 10.1093/petrology/egm083
4. Conticelli S., Guarnieri L., Farinelli A., Mattei M., Avanzinelli R., Bianchini G., Boari E., Tommasini S., Tiepolo M., Prelević D., Venturelli G. Trace elements and Sr–Nd–Pb isotopes of K-rich, shoshonitic, and calc-alkaline magmatism of the Western Mediterranean Region: Genesis of ultrapotassic to calc-alkaline magmatic associations in a post-collisional geodynamic setting. *Lithos*, 2009, vol. 107, no. 1–2, pp. 68–92. DOI: 10.1016/j.lithos.2008.07.016
5. Yang J.-H., Sun J.-F., Zhang M., Wu F.-Y., Wilde S.A. Petrogenesis of silica-saturated and silica-undersaturated syenites in the northern North China Craton related to post-collisional and intraplate extension. *Chemical Geology*, 2012, vol. 328, pp. 149–167. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2011.09.011

6. Bonin B., Azzouni-Sekkal A., Bussy F., Ferrag S. Alkali-calcic and alkaline post-orogenic (PO) granite magmatism: petrologic constraints and geodynamic settings. *Lithos*, 1998, vol. 45, no. 1–4, pp. 45–70. DOI: 10.1016/S0024-4937(98)00025-5
7. Sylvester P.J. Post-Collisional Alkaline Granites. *The Journal of Geology*, 1989, vol. 97, no. 3, pp. 261–280. DOI: 10.1086/629302
8. Whalen J.B., Currie K.L., Chappell B.W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, vol. 95, pp. 407–419. DOI: 10.1007/BF00402202
9. Zhang Z., Qin J., Lai S., Long X., Ju Y., Wang X., Zhu Y., Zhang F. Origin of Late Permian syenite and gabbro from the Panxi rift, SW China: The fractionation process of mafic magma in the inner zone of the Emeishan mantle plume. *Lithos*, 2019, vol. 346–347, Article 105160. DOI: 10.1016/j.lithos.2019.105160
10. Padilha D.F., Bitencourt M.F., Nardi L.V.S., Florisbal L.M., Reis C., Geraldies M., Almeida B.S. Sources and settings of Ediacaran post-collisional syenite-monzonite-diorite shoshonitic magmatism from southernmost Brazil. *Lithos*, 2019, vol. 344–345, pp. 482–503. DOI: 10.1016/j.lithos.2019.06.004
11. Yan X., Jiang Sh.-Y. Petrogenesis and tectonic implications of Early Cretaceous shoshonitic syenites in the northern Wuyi Mt Range, Southeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, vol. 180, article 103877. DOI: 10.1016/j.jseaes.2019.103877
12. Schaarschmidt A., Klemm R., Regelous M., Voudouris P.C., Melfos V., Haase K.M. The formation of shoshonitic magma and its relationship to porphyry-type mineralisation: the Maronia pluton in NE Greece. *Lithos*, 2021, vol. 380–381, Article 105911. DOI: 10.1016/j.lithos.2020.105911
13. Zhang M., Wang C., Zhang Q., Qin Y., Shen J., Hu X., Zhou G., Li S. Temporal-spatial analysis of alkaline rocks based on GEOROC. *Applied Geochemistry*, 2021, vol. 124, Article 104853. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2020.104853
14. Ke S., Teng F.-Z., Li S.-G., Gao T., Liu S.-A., He Y., Mo X. Mg, Sr, and O isotope geochemistry of syenites from northwest Xinjiang, China: Tracing carbonate recycling during Tethyan oceanic subduction. *Chemical Geology*, 2016, vol. 437, pp. 109–119. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2016.05.002
15. Litvinovsky B.A., Jahn B.M., Eyal M. Mantle-derived sources of syenites from the A-type igneous suites – New approach to the provenance of alkaline silicic magmas. *Lithos*, 2015, vol. 232, pp. 242–265. DOI: 10.1016/j.lithos.2015.06.008
16. Zhu Y.-S., Yang J.-H., Sun J.-F., Zhang J.-H., Wu F.-Y. Petrogenesis of coeval silica-saturated and silica-undersaturated alkaline rocks: Mineralogical and geochemical evidence from the Saima alkaline complex, NE China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, vol. 117, pp. 184–207. DOI: 10.1016/j.jseaes.2015.12.014
17. Yang J.-H., Chung S.-L., Wilde S.A., Wu F.-Y., Chu M.-F., Lo C.-H., Fan H.-R. Petrogenesis of post-orogenic syenites in the Sulu Orogenic Belt, East China: geochronological, geochemical and Nd–Sr isotopic evidence. *Chemical Geology*, 2005, vol. 214, no. 1–2, pp. 99–125. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2004.08.053
18. Lynch D.J., Musselman T.E., Gutmann J.T., Patchett P.J. Isotopic evidence for the origin of Cenozoic volcanic rocks in the Pinacate volcanic field, northwestern Mexico. *Lithos*, 1993, vol. 29, no. 3–4, pp. 295–302. DOI: 10.1016/0024-4937(93)90023-6
19. Müller D., Franz L., Herzig P.M., Hunt S. Potassic igneous rocks from the vicinity of epithermal gold mineralization, Lihir Island, Papua New Guinea. *Lithos*, 2001, vol. 57, no. 2–3, pp. 163–186. DOI: 10.1016/S0024-4937(01)00035-4

20. Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Shapovalenko V.N., Collins G.S., Dvurechenskaya S.S., Bukhanova D.S., Ezhov A.I., Voskresensky K.I. The Kirganik alkaline porphyry Cu-Au prospect in Kamchatka, Eastern Russia: A shoshonite-related, silica-undersaturated system in a Late Cretaceous island arc setting. *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 128, Article 103893. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103893
21. Fan W., Jiang N., Hu J., Liu D., Zhao L., Li T. A metasomatized ^{18}O -rich veined lithospheric mantle source for ultrapotassic magmas. *Lithos*, 2021, vol. 382–383, Article 105964. DOI: 10.1016/j.lithos.2020.105964
22. Dai F.-Q., Zhao Z.-F., Zheng Y.-F. Partial melting of the orogenic lower crust: Geochemical insights from post-collisional alkaline volcanics in the Dabie orogen. *Chemical Geology*, 2017, vol. 454, pp. 25–43. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2017.02.022
23. Zhu K.-Y., Li Z.-X., Xu X.-S., Wilde S.A. Late Triassic melting of a thickened crust in southeastern China: Evidence for flat-slab subduction of the Paleo-Pacific plate. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, vol. 74, pp. 265–279. DOI: 10.1016/j.jseaes.2013.01.010
24. Huang W.-L., Wyllie P.J. Melting Reactions in the System $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ – KAlSi_3O_8 – SiO_2 to 35 Kilobars, Dry and with Excess Water. *The Journal of Geology*, 1975, vol. 83, no. 6, pp. 737–748. DOI: 10.1086/628165
25. Oliveira de A.L., Santos dos A.C., Nogueira C.C., Maia T.M., Geraldies M.C. Green core clinopyroxenes from Martin Vaz Archipelago Plio-Pleistocene alkaline rocks, South Atlantic Ocean, Brazil: A magma mixing and polybaric crystallization record. *Journal of South American Earth Sciences*, 2021, vol. 105, Article 102951. DOI: 10.1016/j.jsames.2020.102951
26. Liu D., Zhao Z., DePaolo D.J., Zhu D.-C., Meng F.-Y., Shi Q., Wang Q. Potassic volcanic rocks and adakitic intrusions in southern Tibet: Insights into mantle-crust interaction and mass transfer from Indian plate. *Lithos*, 2017, vol. 268–271, pp. 48–64. DOI: 10.1016/j.lithos.2016.10.034
27. Rukhlov A.S., Blinova A.I., Pawlowicz J.G. Geochemistry, mineralogy and petrology of the Eocene potassic magmatism from the Milk River area, southern Alberta, and Sweet Grass Hills, northern Montana. *Chemical Geology*, 2013, vol. 353, pp. 280–302. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2012.10.024
28. Dostal J., Shellenbarger J.G., Church B.N. Petrogenesis of an Eocene syenitic intrusion from south-central British Columbia: Evidence for increasing influence of cratonic Laurentia on alkaline magmatism of western North America. *Lithos*, 2019, vol. 332–333, pp. 67–82. DOI: 10.1016/j.lithos.2019.01.023
29. Dvornik G.P., Ugryumov A.N., Balahonov V.S. Metasomatity i zolotodzhasperoidnoe orudenenie v kontaktovoj zone Anomal'nogo shchelochnogo massiva s vmeshchayushchimi karbonatnymi porodami [Metasomatites and gold-jasperoid mineralization in the contact zone of the Anomalous alkaline massif with host carbonate rocks]. *Izvestiâ Ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta. Seriya: Geologiya i geofizika*, 2003, no. 18, pp. 105–109. In Rus.
30. Gusev A.I. Zolotonosnye shchelochnye magmaticheskie komplekсы [Gold-bearing alkaline igneous complexes]. *Advances in current natural sciences*, 2012, no. 9, pp. 47–52. In Rus.
31. Hou Z., Xie Y., Xu W., Li Y., Zhu X., Khin Z., Beaudoin G., Rui Z., Huang W., Luobu C. Yulong Deposit, Eastern Tibet: A High-Sulfidation Cu-Au Porphyry Copper Deposit in the Eastern Indo-Asian Collision Zone. *International Geology Review*, 2007, vol. 49, no. 3, pp. 235–258. DOI: 10.2747/0020-6814.49.3.235

32. Li H., Li J.-W., Algeo T.J., Wu J.-H., Cisse M. Zircon indicators of fluid sources and ore genesis in a multi-stage hydrothermal system: The Dongping Au deposit in North China. *Lithos*, 2018, vol. 314–315, pp. 463–478. DOI: 10.1016/j.lithos.2018.06.025
33. Bao Z., Li C., Zhao Z. Metallogeny of the syenite-related Dongping gold deposit in the northern part of the North China Craton: A review and synthesis. *Ore Geology Reviews*, 2016, vol. 73, part 2, pp. 198–210. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2015.04.002
34. Shokal'skii S.P., Babin G.A., Vladimirov A.G. et al. *Korrelyatsiya magmaticheskikh i metamorficheskikh kompleksov zapadnoi chasti Altae-Sayanskoi skladchatoi oblasti* [Correlation of magmatic and metamorphic complexes in the western part of the Altai-Sayan fold area]. Novosibirsk, 2000. 188 p. In Rus.
35. Gusev A.I., Tabakaeva E.M. *Magmatizm i metallogeniya Salaira* [Magmatism and metallogeny of Salair]. Biysk, AGGPU im. V.M. Shukshina, 2017. 182 p. In Rus.
36. Middlemost E.A.K. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 1994, vol. 37, no. 3–4, pp. 215–224. DOI: 10.1016/0012-8252(94)90029-9
37. Wright J.B. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis. *Geological Magazine*, 1969, vol. 106, no. 4, pp. 370–384. DOI: 10.1017/S0016756800058222
38. Patiño Douce A.E. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? *Geological Society, London, Special Publications*, 1999, vol. 168, pp. 55–75. DOI: 10.1144/GSL.SP.1999.168.01.05
39. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, vol. 63, no. 3–4, pp. 489–508. DOI: 10.1016/S0016-7037(99)00027-7
40. Anders E., Grevesse N. Abundances of the elements: Meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, vol. 53, no. 1, pp. 197–214. DOI: 10.1016/0016-7037(89)90286-X
41. Peccerillo A., Taylor S.R. Rare earth elements in East Carpathian volcanic rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 1976, vol. 32, no. 2, pp. 121–126. DOI: 10.1016/0012-821X(76)90050-9
42. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust. In R. Rudnick (Ed.), *Treatise on Geochemistry, Volume 3: The Crust*. Amsterdam, Elsevier, 2003. pp. 1–64. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4
43. Frost C.D., Frost B.R. Reduced rapakivi-type granites: The tholeiite connection. *Geology*, 1997, vol. 25, no. 7, pp. 647–650. DOI: 10.1130/0091-7613(1997)025<0647:RRTGTT>2.3.CO;2
44. Zhao Z., Qi L., Huang Z.L., Yan Z.F., Xu C. Trace elements and Sr-Nd isotopic geochemistry and genesis of Jijie alkaline-ultramafic rocks, southern part of Panxi rift. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, no. 6, pp. 1915–1927.
45. Ewart A. A review of the mineralogy and chemistry of Tertiary-Recent dacitic, latitic, rhyolitic, and related salic volcanic rocks. In F. Barker (Ed.), *Trondjemites, Dacites, and Related Rocks*. Amsterdam, Elsevier, 1979. pp. 13–121.
46. Ewart A. The mineralogy and petrology of Tertiary – Recent orogenic volcanic rocks: with special reference to the andesitic-basaltic compositional range. R.S. Thorpe (Ed.), *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. Chichester, New York, Brisbane, Toronto, and Singapore, John Wiley and Sons, 1982. pp. 25–95.
47. Vinogradov A.P. Srednee sodержanie himicheskikh elementov v gornyh porodah [Average content of chemical elements in rocks]. *Geochemistry International*, 1962, no. 7, pp. 555–571. In Rus.

48. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Compositions of chondrites. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1988, vol. 325, no. 1587, pp. 535–544. DOI: 10.1098/rsta.1988.0066

Received: 06 January 2021.