



Оригинальная статья

Вещественный состав и U-Pb возраст магматических пород Эвотинского массива (Южная Якутия, Алдано-Становой щит)

М. С. Иванов^{✉1}, А. И. Иванов¹, А. И. Журавлев¹, Е. Е. Лоскутов¹,
А. А. Кравченко¹, В. Е. Гузев², А. В. Терехов²

¹Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

²Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

[✉]ivanov.michil@bk.ru

Аннотация

Проблемы определения металлогенической специализации магматических пород рудных районов всегда актуальны и дискуссионны. В решении этих задач ключевой момент – комплексное изучение отдельно взятых объектов с целью выявления особенностей петрографического и петро-геохимического составов магматических пород, а также геохронологические исследования во взаимосвязи с условиями образования и металлогенической оценкой последних, позволяющие получить объективную картину. Одним из таких образований является Эвотинский массив, пространственно входящий в одноименный рудно-россыпной район центральной части Алдано-Станового щита. При исследовании магматических образований главных фаз массива были использованы образцы пород, отобранные в ходе полевых работ 2018–2020 гг., с последующей обработкой и определением основных компонентов методами силикатного, многоэлементного анализов в отделе физико-химических методов анализа Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН и масс-спектрометрии в лаборатории ООО «ХАЦ Плазма», г. Томск. Геохронологические исследования U-Pb методом (SIMS, SHRIMP-II) по цирконам проводились в Центре изотопных исследований Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского. В результате изучения и интерпретации аналитического материала получены следующие результаты и выводы: Эвотинский массив имеет антидромное строение. Установлены две фазы внедрения: первая – амфиболовые кварцевые сиениты, вторая – амфибол-пироксеновые кварцевые монцониты. Породы принадлежат к высококальциевой известково-щелочной петрохимической серии и соответствуют производным шошонит-латитового ряда. Установлен вклад в формирование массива как мантйных, так и коровых источников. По петрогеохимическим параметрам, соотношению редких элементов Rb, Y, Yb, Ta породы массива близки составам вулканитов окраинно-континентальных и островных дуг. U-Pb возраст по циркону (SHRIMP II) амфиболовых кварцевых сиенитов – 119 ± 1 млн лет, амфибол-пироксеновых кварцевых монцонитов – 117 ± 1 млн лет (аптский век раннего мела). Один из основных выводов состоит в том, что образование Эвотинского массива происходило в условиях задугового растяжения на заключительных стадиях закрытия Монголо-Охотского океана, а также показан минерогенический потенциал Эвотинского массива на золотую минерализацию.

Ключевые слова: Алдано-Становой щит, Эвотинский рудно-россыпной район, магматизм, U-Pb возраст циркона, кварцевые сиениты, кварцевые монцониты

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзадания ИГАБМ СО РАН (проект № FUG-2024-0005).

Благодарности. Авторы выражают благодарность за проведение аналитических работ сотрудникам ИГАБМ СО РАН Л.Т. Галенчиковой и С.Ю. Коркиной.

Для цитирования: Иванов М.С., Иванов А.И., Журавлев А.И., Лоскутов Е.Е., Кравченко А.А., Гузев В. Е., Терехов А.В. Вещественный состав и U-Pb возраст магматических пород Эвотинского массива (Южная Якутия, Алдано-Становой щит). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(4):572–588. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-572-588>

Composition and U-Pb age of igneous rocks of the Evotinsky massif (Southern Yakutia, Aldan-Stanovoy shield)

Michil S. Ivanov^{✉,1}, Aleksey I. Ivanov¹, Anatoliy I. Zhuravlev¹, Evgeniy E. Loskutov¹,
Alexander A. Kravchenko¹, Vladislav E. Guzev², Artem V. Terekhov²

¹Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, Russian Federation

²Russian Geological Research Institute (VSEGEI), St. Petersburg, Russian Federation

[✉]ivanov.michil@bk.ru

Abstract

Determining the metallogenic specialization of igneous rocks in ore districts remains a pressing and often controversial challenge. Addressing this issue requires a comprehensive approach, that integrates petrographic and petrogeochemical data with geochronological studies of individual formations. Such integrated analysis, when contextualized within specific formation conditions and metallogenic assessments, provides a robust framework for interpretation. The Evotinsky massif, located within the eponymous Evotinsky placer ore region in the central Aldan-Stanovoy shield, represents one such critical formation. This study investigates its petrogenesis based on rock samples collected during fieldwork from 2018 to 2020, focusing on the massif's main phases. Subsequent processing and major element analysis were performed using silicate and multielement techniques at the Department of Physicochemical Analysis Methods of the Diamond and Precious Metals Geology Institute SB RAS (Yakutsk). Trace element concentrations were determined by mass spectrometry at the CAC Plasma LLC laboratory (Tomsk). Finally, geochronological U-Pb dating of zircons was conducted using SIMS (SHRIMP-II) at the Center for Isotope Research of the Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). The Evotinsky massif displays an antidromous structure and comprises two intrusive phases: an earlier phase of amphibole quartz syenites and a later phase of amphibole-pyroxene quartz monzonites. The rocks are classified within the high-potassium calc-alkaline series, corresponding to derivatives of the shoshonite-latitude series. Geochemical data indicate a mixed mantle and crustal source for the magmas. Petrochemical parameters and trace element ratios (Rb, Y, Yb, Ta) show compositions analogous to volcanic rocks from continental margins and island arcs. U-Pb zircon geochronology (SHRIMP II) constrains the emplacement of the amphibole quartz syenites to 119 ± 1 Ma and the amphibole-pyroxene quartz monzonites to 117 ± 1 Ma (Aptian, Early Cretaceous). In conclusion, the Evotinsky massif formed under back-arc extensional conditions during the final stages of the Mongol-Okhotsk Ocean closure. Furthermore, these findings demonstrate the massif's significant potential for gold mineralization.

Keywords: Aldan-Stanovoy shield, Evotinsky gold-bearing region, magmatism, U-Pb age from zircons, quartz syenites, quartz monzonites

Funding. This study was conducted within the framework of the state assignment for the Diamond and Precious Metals Geology Institute SB RAS (project No. FUG-2024-0005).

Acknowledgements. The authors are grateful to L.T. Galenchikova and **S.Yu. Korkina** from the Diamond and Precious Metals Geology Institute SB RAS for conducting the analytical work.

For citation: Ivanov M.S., Ivanov A.I., Zhuravlev A.I., Loskutov E.E., **Kravchenko A.A.**, Guzev V.E., Terekhov A.V. Composition and U-Pb age of igneous rocks of the Evotinsky massif (Southern Yakutia, Aldan-Stanovoy shield). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(4):572–588. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-4-572-588>

Введение

Эвотинский массив расположен в западной части гранулит-ортогнейсового Нимнырского террейна (рис. 1, а) Алдано-Станового щита в пределах одноименного рудно-россыпного района [1]. Последний расположен на границе с Ам-

гинской зоной тектонического меланжа в непосредственной близости с Чульманской впадиной мезозойского возраста. В геологическом строении района принимают участие раннедокембрийские метаморфические породы, представленные биотит-пироксен-амфиболовыми и силлиманит-

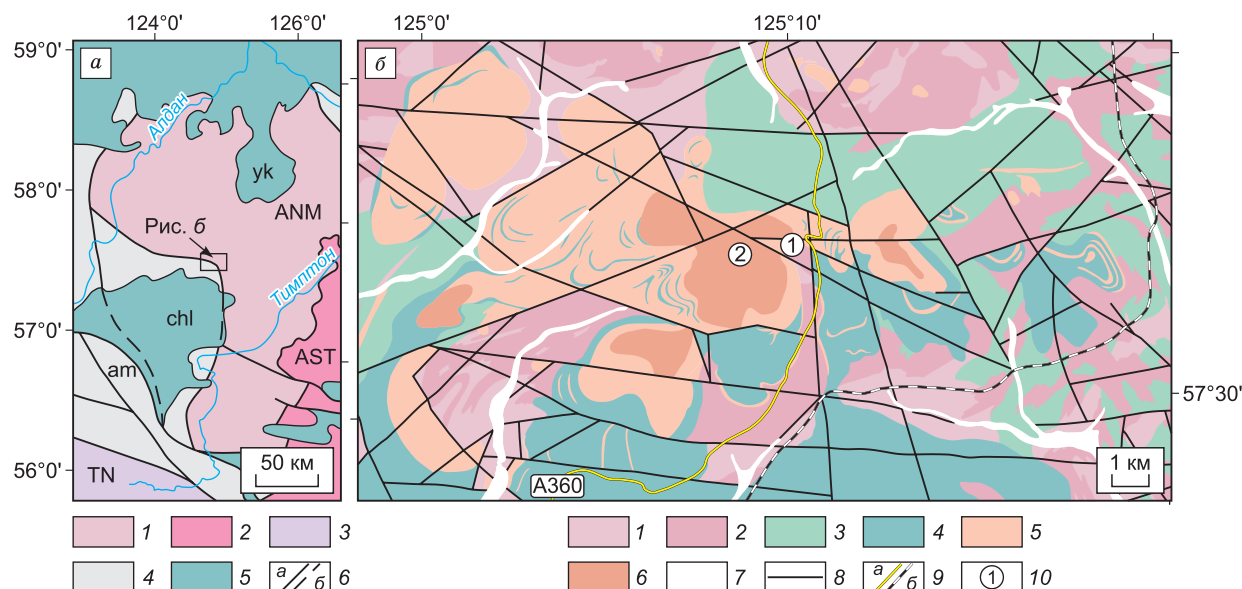


Рис. 1. Тектоническая схема центральной части Алдано-Станового щита (по [1]): 1 – гранулит-ортогнейсовый Нимнырский (ANM) террейн; 2 – гранулит-парагнейсовый Сутамский (AST) террейн; 3 – тоналит-тронджемит-гнейсовый Тындинский (TN) террейн; 4 – Амгинская (am) зона тектонического меланжа; 5 – породы чехла Сибирской платформы (chl – Чульманская впадина, ук – Якокутский грабен); 6 – разломы явные (а) и скрытые (б). Схема геологического строения Эвотинского массива (по фоновым материалам И.Д. Вороны и Л.М. Реутова, 1963 с дополнениями) (б): 1 – федоровская толща; 2 – докембрийские граниты и гранитоиды; 3 – габбро-диориты унгринского комплекса; 4 – венд-раннекембрийские доломиты усть-юдомской свиты; Эвотинский массив: 5 – кварцевые сиениты, 6 – кварцевые монзониты; 7 – четвертичные отложения; 8 – разломы; 9 – автотрасса А360 «Лена» (а) и железная дорога (б); 10 – места отбора образцов на определение возраста: 1 – Э18-11, 2 – Э18-13

Fig. 1. *a* – Tectonic scheme of the central part of the Aldan-Stanovoy shield (after [1]): 1 – granulite-orthogneiss Nimnyr (ANM) terrane; 2 – granulite-paragneiss Sutam (AST) terrane; 3 – tonalite-trondhjemite-gneiss Tynda (TN) terrane; 4 – Amginskaya (am) zone of tectonic mélange; 5 – rocks of the Siberian platform cover: chl – Chulman depression, and yk – Yakokutsky graben; 6 – obvious (a) and hidden (b) faults. *b* – Scheme of the geological structure of the Evotinsky massif (based on archive materials of I.D. Vorona and L.M. Reutov, 1963 with additions): 1 – Fedorovskaya sequence; 2 – Precambrian granites and granitoids; 3 – gabbro-diorites of the Unginsky complex; 4 – Vendian-Early Cambrian dolomites of the Ust-Yudomskaya suite; Evotinsky massif: 5 – quartz syenites, 6 – quartz monzonites; 7 – Quaternary deposits; 8 – faults; 9 – A360 Lena highway (a) and railway (b); 10 – sampling locations for age determination: 1 – E18-11, 2 – E18-13

гранат-кордиеритовыми гнейсами, а также кристаллосланцами с горизонтами, прослоями и линзами кварцитов, мраморов, кальцифиров в составе курумканской, нимнырской и федоровской свит верхнеалданской и тимптонской серий. Эти образования, прорванные многочисленными дайками позднепротерозойских долеритов, интенсивно деформированы с образованием сложной системы пликтивных и дизъюнктивных нарушений [1, 2]. Венд-нижнекембрийские карбонатные и нижнеюрские терригенные породы платформенного чехла сохранились преимущественно в южной, юго-западной и северной частях района. В эпоху мезозойской тектоно-магматической активизации были сформированы щелочные и умеренно щелочные породы монзонит-сиенитовой формации [2]: массивы Медведевский, Таежный, Михайловский и др., а также силлы и дайки [3].

Ранее в пределах Эвотинского рудно-россыпного района авторами были определены петрологические характеристики пород Медведевского и Таежного массивов, определен интервал становления интрузивов 122,0–114,5 млн лет; выявлены принадлежность всех образований к монзонит-сиенитовой формации [3] и генетическая связь золоторудной минерализации с мезозойским магматизмом [2].

В пределах рассматриваемой территории разведано лишь одно месторождение рудного золота (им. П. Пинигина) и ряд мелких рудопроявлений (Бривас, Унга-Нимгеркан и др.), которые пространственно и генетически связывают с докембрийскими метагаббро медведевского комплекса [4].

По аналогии с Центрально-Алданским рудным районом здесь можно ожидать обнаруже-

ния золоторудных объектов, связанных со скарированными отложениями венд-кембрийского возраста на контакте с мезозойскими сиенитами, где известны находки кварц-сульфидных руд [2]. Стоит отметить, что, несмотря на длительный период изучения мезозойского магматизма Алдано-Станового щита [2, 4; и др.], до сих пор не сняты многие вопросы эволюции и металлогении магматических пород этого возраста. Следовательно, актуальным является изучение отдельных крупных многофазовых массивов, таких как Эвотинский плутон (рис. 1, б), с целью определения петрогеохимических параметров составов, геохронологии и потенциальной рудоносности слагающих их пород.

Материалы и методы

Образцы для выполнения анализов, а также пробы для определения возраста (весом до 10 кг) были отобраны в ходе полевых работ 2018–2020 гг. в пределах Эвотинского рудно-россыпного района. Петрографический состав (30 шлифов) изучался с помощью поляризационного микроскопа МИН-8. Определение основных компонентов по 23 образцам проводилось методами силикатного анализа (Л.Т. Галенчикова), микроэлементов – многоэлементной атомно-эмиссионной спектроскопии (С.Ю. Коркина) в отделе физико-химических методов анализа Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН (ИГАБМ СО РАН, г. Якутск). Анализ редких элементов (4 образца) проводился на масс-спектрометре ЭЛАН, ДРК-э (ООО «ХАЦ Плазма», Томск, Россия). U-Pb датирование цирконов (SIMS, SHRIMP-II) выполнено в Центре изотопных исследований Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского по методике, описанной нами в [3].

Результаты исследований

Геология и петрография магматических пород Эвотинского массива. Площадь выходов Эвотинского массива на дневную поверхность составляет 100 км² (см. рис. 1, б). По данным В.Г. Амарского, в строении Эвотинского плутона были выделены две фазы, которые интродуцируют породы чехла и фундамента: первая – авгит-роговообманковые кварцевые сиенит-порфиры, вторая – роговообманковые граносиенит-порфиры (см. рис. 1, б) [5]. Массив прорван дайками щелочных сиенит-порфиров и известково-щелочных лампрофиров, протяженность которых достигает 1 км при мощности в первые десятки метров [5]. В южной части массив осложняется многочисленными субгоризонтальными апофизами кварцевых сиенитов мощностью до 40 м и протяженностью в первые километры (в данной работе эти породы не рассматриваются). Вмещающие породы в северном экзоконтакте массива катаклазированы, милонитизированы, тогда как в эндоконтактных частях эти изменения не наблюдаются [5].

По результатам полевых и петрографических исследований авторами установлено, что составы фаз внедрения Эвотинского массива отличаются от описанных ранее В.Г. Амарским [5] и представлены двумя разновидностями: первая фаза – амфиболовые кварцевые сиениты, вторая фаза – амфибол-пироксеновые кварцевые монцониты. По нашим данным, значительная площадь массива сложена породами ранней фазы в краевых частях; образования поздней фазы занимают его центральную область. Последовательность внедрения основных фаз массива определена по вкрапленникам ортоклаза, олигоклаза и темноцветных минералов второй фазы амфибол-пироксеновых кварцевых монцонитов, в которых по мере приближения к контакту с амфибол-кварцевыми сиенитами перечисленные кристаллы минералов уменьшаются в размере. Это может указывать на быстрое проникновение поздней фазы в центральную часть плутона. Ранние образования не успели закристаллизоваться и были прорваны расплавами второй фазы с формированием нормальной (прямой) зональности массива [6]. Последовательность внедрения фаз также подтверждается петрографическими исследованиями – наблюдаются каймы плавления олигоклаза и ортоклаза в амфиболовых кварцевых сиенитах, подвергшихся серицитизации, пелитизации и хлоритизации.

Амфиболовые кварцевые сиениты – светло-серые, розовато-серые, лейкократовые породы, содержащие не более 10 % темноцветных минералов. Структура – порфировая с полнокристаллической основной массой, текстура массивная. Породы содержат ортоклаз – 50 %, олигоклаз – 35, кварц – 10, амфибол – 10 (роговую обманку и баркевикит), рудные минералы – до 3 %. Вторичные минералы представлены карбонатом, хлоритом, эпидотом, серицитом и мусковитом;

акцессорные минералы – апатитом, цирконом и магнетитом.

Амфибол-пироксеновые кварцевые монцитониты – серые, розовато-серые порфировые породы, с гипидиоморфно-зернистой основной массой и резким идиоморфизмом плагиоклаза над ортоклазом во вкрапленниках (элементы монцитонитовой структуры). Минеральный состав пород: альбит, олигоклаз – 30 %, ортоклаз – 35, темноцветные минералы (роговая обманка, авгит) – 15, кварц – 13, рудные минералы – 5, акцессорные минералы (апатит, циркон) – 2 %. Вкрапленники представлены альбитом, олигоклазом, ортоклазом и темноцветными минералами. Основная масса сложена олигоклазом, ортоклазом и роговой обманкой. Следует отметить присутствие в породе ксенолитов протерозойских гранитов.

Петрогеохимический состав магматических пород Эвотинского массива. Выделенные при петрографическом исследовании породы ранней фазы по химическому составу ($\text{SiO}_2 = 65,4\text{--}67,6\%$; $\text{TiO}_2 = 0,27\text{--}0,43$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14,4\text{--}16,1$; $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 1,04\text{--}2,46$; $\text{FeO} = 1,28\text{--}1,98$; $\text{CaO} = 1,57\text{--}3,04$; $\text{Na}_2\text{O} = 4,76\text{--}5,32$; $\text{K}_2\text{O} = 3,55\text{--}4,49\%$) и суммарному содержанию щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 8,51\text{--}9,56 < 12\%$) (табл. 1) относятся к умеренно щелочным амфиболовым кварцевым сиенитам [7]. Породы характеризуются калиево-натриевым типом щелочности [7] ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1,12\text{--}1,40$) и относятся к высокоглиноземистой серии [8] ($al' = 2,39\text{--}4,59$), при значениях индексов $ASI = 0,78\text{--}1,09 < 1,15$ и железистости $f^* = 0,54\text{--}0,78$ (см. табл. 1). Согласно классификационной диаграмме $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{--SiO}_2$ [9], составы пород ранней фазы соотносятся как с гранитами, так и частично с сиенитами (рис. 2, а). По отношениям $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{--SiO}_2$ [10] и $R_1\text{--}R_2$ [11] породы первой фазы относятся к кварцевым моноцитонитам (рис. 2, б, в). По соотношению $\text{K}_2\text{O}\text{--SiO}_2$ [12] последние отвечают таковым высококалиевой известково-щелочной петрохимической серии пород (рис. 2, г).

Амфибол-пироксеновые кварцевые монцитониты второй фазы, в отличие от ранних пород, характеризуются низкими значениями $\text{SiO}_2 = 63,77\text{--}64,42\%$, $\text{MgO} = 0,44\text{--}0,89\%$ и высокими содержаниями большинства оксидов ($\text{TiO}_2 = 0,37\text{--}0,56\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 16,24\text{--}16,64$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 1,77\text{--}2,39$, $\text{FeO} = 1,47\text{--}2,08$, $\text{CaO} = 3,12\text{--}3,16$, $\text{Na}_2\text{O} = 4,99$, $\text{K}_2\text{O} = 4,21\text{--}4,57\%$), а также более

высокой суммарной щелочностью ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 9,24\text{--}9,76 < 12$ (см. табл. 1), отвечающей умеренно щелочным породам [7]. Образования второй фазы характеризуются калиево-натриевым типом щелочности ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1,12\text{--}1,21$) и относятся к высокоглиноземистой серии ($al' = 2,91\text{--}3,31$), при низких по сравнению с породами ранней фазы значениях индекса $ASI = 0,86\text{--}0,87 < 1$ и более высокой железистости $f^* = 0,60\text{--}0,79$ (см. табл. 1). На классификационных диаграммах [9–11] составы пород поздней фазы занимают поля кварцевых моноцитонитов (см. рис. 2, а–в). По соотношению $\text{K}_2\text{O}\text{--SiO}_2$ [12] они относятся к высококалиевой известково-щелочной петрохимической серии магматических пород (см. рис. 2, г).

Амфиболовые кварцевые сиениты Эвотинского массива геохимически специализированы на литофильные элементы Rb, Sr, Ba, B, Cr, V, Nb, Zr (здесь и далее классификация элементов дана по [13]), концентрация в них халькофильных Cu, Sn, Zn Pb, Ge и сидерофильных Ni, Co элементов ниже, что характерно для производных латитовой серии [14] (табл. 2). Породы ранней фазы по высокому содержанию индикаторных крупноионных элементов Sr (700 г/т) = 750–1100 г/т (в скобках здесь и далее индикаторные элементы по [14]), Ba (1700 г/т) = 1600–3100 г/т (один из геохимических признаков латитов [14]), Co (11,2 г/т) = 4,80–8,82 г/т, а также по концентрациям микроэлементного состава Hf (3,2 г/т) = 2,42–2,97 г/т, Yb (1,2 г/т) = 0,90–1,06 г/т и отношениям La/Yb (>12 [14]) = 12,35–12,9; Ce/Yb (>22 [15]) = 25,78–26,42 (см. табл. 2, 3) наиболее близки к производным латитов шошонитового типа [15]. Породы имеют плавный отрицательный наклон в распределении РЗЭ при проявлении отрицательной Eu аномалии ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,51\text{--}1,04$) (табл. 3); они обогащены цериевыми (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu) и обеднены иттриевыми (Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) элементами (см. табл. 3, рис. 3, а). На спайдер-диаграмме отчетливо заметны минимумы для Rb, Th, Nb, Ta, Nd, а также ярко выраженные максимумы значений для Ba, U, La и Sr (см. рис. 3, б).

Амфибол-пироксеновые кварцевые монцитониты массива специализированы на тот же круг элементов, что и породы предыдущей фазы (см. табл. 2), но отличаются повышенными содержаниями литофильных (Sr, Ba, V, Sc, Nb, Zr, Y), а также части халькофильных (Cu, Zn) и сидерофильных

Таблица 1

Петрохимический состав магматических пород Эвотинского массива

Table 1

Petrochemical composition of igneous rocks of the Evotinsky massif

Компонент	Фаза 1										Фаза 2												
	Э18-11	Э18-11/1	Э18-11/2	Э18-11/3	Э18-12	Э18-12/2	Э18-12/3	Э18-12/4	И19-43	И19-43/2	И19-43/3	И19-43/4	И19-43/5	И19-43/6	Э18-13	Э18-13/1	Э18-13/2	Э18-14	Э18-14/1	Э18-15	Э18-15/1	Э18-15/2	Э18-15/3
SiO ₂	67,6	66,3	66,1	66,7	65,5	65,7	66,8	65,4	65,9	65,6	67,3	65,9	66,7	67,1	64,1	64,4	63,7	64,6	64,3	64,3	64,1	63,8	64,3
TiO ₂	0,36	0,42	0,27	0,31	0,34	0,51	0,43	0,27	0,43	0,37	0,35	0,35	0,30	0,41	0,44	0,46	0,55	0,53	0,37	0,40	0,46	0,55	
Al ₂ O ₃	16,1	15,7	16,1	15,8	15,4	15,9	16,1	15,4	15,4	15,4	15,2	15,7	14,4	14,4	16,37	16,25	16,64	16,43	16,40	16,43	16,48	16,61	
Fe ₂ O ₃	1,68	1,07	1,42	1,65	1,59	1,57	1,04	1,52	2,46	2,00	2,17	2,01	1,40	1,75	1,93	1,84	1,98	1,79	2,02	1,77	2,39	2,35	
FeO	1,42	1,83	1,52	1,48	1,56	1,98	1,71	1,44	1,29	1,28	1,28	1,58	1,22	1,81	2,08	1,82	1,80	1,66	1,47	1,69	1,61	1,64	
MnO	0,08	0,06	0,06	0,06	0,07	0,08	0,07	0,06	0,08	0,07	0,07	0,07	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,09	0,08	0,07	0,07	0,08	
MgO	0,75	0,89	0,89	0,95	0,97	1,13	0,35	0,87	0,76	0,72	0,99	0,80	0,49	1,26	0,44	0,61	0,61	0,68	0,89	0,71	0,65	0,47	
CaO	1,57	2,08	2,09	1,95	2,59	2,54	2,93	3,07	2,84	2,93	1,71	2,96	3,04	2,75	3,18	3,21	3,38	3,35	3,27	3,12	3,16	3,25	
Na ₂ O	4,76	4,91	4,79	4,95	4,83	4,91	4,91	4,96	5,03	5,21	5,21	5,05	5,32	4,94	5,11	5,07	5,07	5,03	5,03	5,19	4,99	5,07	
K ₂ O	3,82	4,21	4,28	3,90	3,97	3,84	3,82	3,55	4,21	4,35	4,49	4,07	3,87	4,19	4,23	4,32	4,26	4,21	4,34	4,57	4,47	4,51	
H ₂ O ⁻	0,24	0,20	0,26	0,26	0,16	0,20	0,24	0,30	0,24	0,18	0,20	0,24	0,22	0,14	0,22	0,22	0,28	0,18	0,18	0,16	0,24	0,16	
H ₂ O ⁺	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,97	0,71	0,38	0,40	0,98	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
P ₂ O ₅	0,24	0,25	0,24	0,22	0,21	0,24	0,24	0,22	0,20	0,20	0,21	0,19	0,15	0,21	0,18	0,19	0,22	0,23	0,22	0,20	0,20	0,21	
CO ₂	0,16	0,42	0,39	0,47	1,19	0,31	0,49	1,68	0,81	0,64	0,14	0,08	1,31	0,08	0,56	0,53	0,40	0,26	0,42	0,44	0,45	0,40	
S	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
F	0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05	0,07	0,09	0,08	0,09	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	0,05	
Сумма	99,3	99,1	99,1	99,4	99,2	99,3	99,3	99,4	100,7	99,9	99,9	99,5	100,4	99,7	99,3	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1	99,3	99,2	
Na ₂ O+K ₂ O	8,58	9,12	9,07	8,85	8,80	8,75	8,73	8,51	9,24	9,56	9,70	9,12	9,19	9,13	9,34	9,39	9,33	9,24	9,37	9,76	9,46	9,58	
Na ₂ O/K ₂ O	1,25	1,17	1,12	1,27	1,22	1,28	1,29	1,40	1,19	1,20	1,16	1,24	1,37	1,18	1,21	1,17	1,19	1,19	1,16	1,14	1,12	1,12	
al'	3,23	2,84	3,03	2,86	2,72	2,39	4,04	2,97	2,90	3,14	2,67	4,59	3,74	2,10	3,09	3,07	3,10	3,15	2,91	3,09	3,02	3,31	
ASI	1,09	0,96	0,99	1,00	0,91	0,95	0,92	0,88	0,86	0,83	0,92	1,02	0,78	0,82	0,87	0,86	0,87	0,87	0,87	0,86	0,88	0,87	
f'	0,62	0,59	0,58	0,57	0,57	0,57	0,78	0,58	0,64	0,63	0,56	0,70	0,68	0,54	0,79	0,71	0,71	0,67	0,60	0,66	0,70	0,76	

Примечание. Составы пород Эвотинского массива: фаза 1 – амфиболовые кварцевые сyenиты, фаза 2 – амфибол-пироксеновые кварцевые монзониты. Все значения, кроме коэффициентов даны в мас. %; al' = Al/(Fe*+Mg), ASI = Al/(Ca–1,67×P+Na+K), f^{*} = Fe*/(Fe*+Mg) – молекулярные количества.

Note. Rock compositions of the Evotinsky massif: 1 – amphibole quartz syenites, 2 – amphibole-pyroxene quartz monzonites. All values except coefficients are given in wt. %; al' = Al/(Fe*+Mg), ASI = Al/(Ca–1,67×P+Na+K), f^{*} = Fe*/(Fe*+Mg) – molecular quantities.

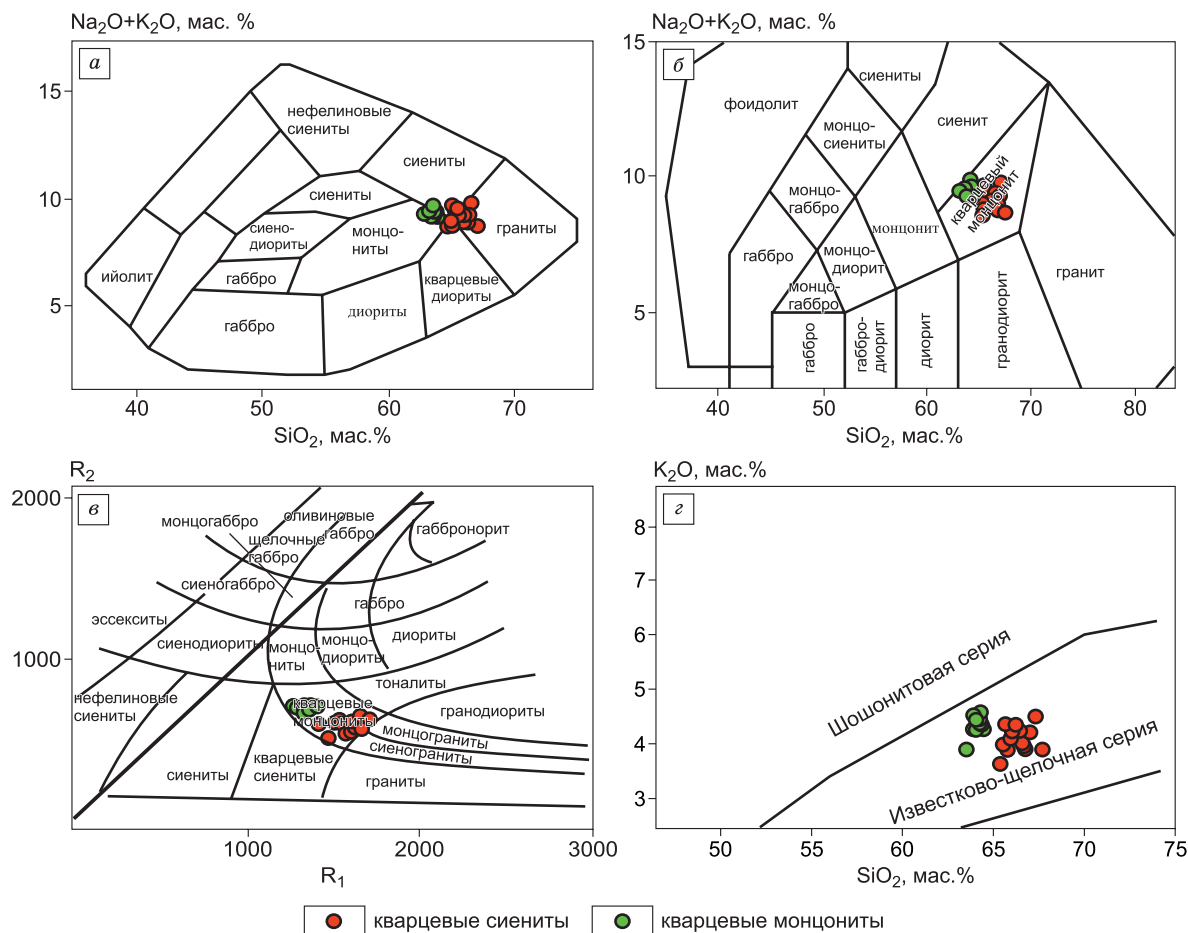


Рис. 2. Классификационные диаграммы для пород Эвотинского массива. а, б – диаграммы $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ - SiO_2 [9, 10]; в – диаграмма (R_1-R_2) [11] ($R_1 = 4\text{Si}-11(\text{Na}+\text{K})$, $R_2 = 6\text{Ca}+2\text{Mg}+\text{Al}$, молекулярные количества); з – диаграмма K_2O - SiO_2 [12]

Fig. 2. Classification diagrams for the rocks of the Evotinsky massif. (а, б) – diagrams $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ - SiO_2 [9, 10]; (в) – diagram (R_1-R_2) [11] ($R_1 = 4\text{Si}-11(\text{Na}+\text{K})$, $R_2 = 6\text{Ca}+2\text{Mg}+\text{Al}$, molecular quantities); з – diagram K_2O - SiO_2 [12]

(Co) элементов (см. табл. 2, 3). Породы второй фазы по высокому содержанию Sr (700 г/т) = 1100–1400 г/т, Ba (1700 г/т) = 2100–3400 г/т, Co (11,2 г/т) = 5,97–11,20 г/т, содержанию микроэлементов La (18 г/т) = 15,03–21,80 г/т, Ce (35 г/т) = 31,47–41,74 г/т, Yb (1,2 г/т) = 1,20–1,30 г/т и отношениям La/Yb (>12 [14]) = 12,52–16,76, Ce/Yb (>22 [15]) = 26,23–32,15 (см. табл. 2, 3) наиболее близки к производным латитов шошонитового типа [15]. Кварцевые монзониты обогащены цериевыми (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu) и обеднены иттриевыми (Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) элементами, имеют слабую отрицательную Eu-аномалию (Eu/Eu^* до 0,79–0,83). Характер распределения РЗЭ аналогичен породам первой фазы, но в целом при более высоких значениях всех РЗЭ (см. табл. 3, рис. 3, а). На спайдер-диаграмме отмечается аналогичное распределение большинства микроэлементов от-

носительно кварцевых сиенитов за исключением Zr, Eu, Dy, Yb и Lu (см. рис. 3, б).

Геохронологические исследования магматических пород Эвотинского массива. Как уже отмечалось, Эвотинский массив имеет двухфазовое строение: ранние – амфиболовые кварцевые сиениты и поздние – амфибол-пироксеновые кварцевые монзониты. Для геохронологических исследований нами были отобраны две пробы из наименее измененных пород (фазы внедрения, образцы: первая – Э19-11, вторая – Э19-13) с последующим выделением из них цирконов, по которым было сделано 30 изотопных U-Pb определений возраста (SHRIMP-II) (табл. 4).

Кристаллы цирконов из пород первой и второй фаз внедрения представлены в основном крупными, удлиненными (коэффициент удлинения 1:2–6) призматическими индивидами (250–600 мкм по длинной оси) и их обломками (190–

Т а б л и ц а 2

Геохимический состав магматических пород Эвотинского массива

Table 2

GEOCHEMICAL COMPOSITION OF IGNEOUS ROCKS OF THE EVOTINSKY MASSIF

Номер пробы	Фаза	I литофильные										II халькофильные					III сидерофильные		
		Sr	Ba	Cr	V	Sc	Nb	Zr	Y	Cu	Sn	Zn	Pb	Ge	Ni	Co			
Э18-11	1	980,00	3000,00	100	50,70	8,75	7,98	110,00	16,40	3,3	1,77	32,40	66,70	1,20	15,40	5,83			
Э18-11/1		920,00	2800,00	42	51,00	6,31	10,80	100,00	13,20	15,40	2,01	52,50	71,60	1,66	13,90	6,79			
Э18-11/2		1100,00	3100,00	190	61,60	7,30	8,78	83,40	13,80	30,80	3,53	33,30	69,50	1,48	16,00	6,14			
Э18-11/3		860,00	2200,00	220	50,40	6,10	13,20	88,00	12,20	24,60	2,97	29,50	67,60	1,45	14,30	6,38			
Э18-12		900,00	3100,00	150	59,10	7,45	7,65	96,30	13,30	13	2,02	39,80	82,60	1,73	15,70	6,68			
Э18/12/2		980,00	2500,00	52	71,70	9,54	12,30	92,90	13,40	28,80	4,28	36,40	81,80	1,52	15,50	8,82			
Э18-12/3		870,00	1900,00	260,00	44,40	5,41	10,80	89,20	10,60	17,90	2,71	38,10	74,80	1,30	15,70	6,18			
Э18-12/4		900,00	1900,00	210	43,90	7,03	7,68	92,90	11,90	91,20	5,06	39,70	82,10	1,65	19,20	5,94			
И19-43		1100,00	1900,00	160,00	66,20	8,32	5,32	110,00	10,30	5,24	<4	65,00	42,40	<2,2	15,10	6,05			
И19-43/2		950,00	1900,00	110,00	59,90	7,04	8,67	110,00	9,33	<5	<4	69,00	49,50	<2,2	13,40	6,36			
И19-43/3		860,00	2300,00	130,00	68,20	7,25	10,80	97,70	8,07	6,74	<4	67,00	56,60	<2,2	13,70	6,87			
И19-43/4		910,00	2100,00	150,00	66,40	6,58	5,91	95,40	9,43	16,50	<4	66,40	44,70	<2,2	14,50	6,39			
И19-43/5		750,00	1600,00	190,00	55,70	5,68	4,64	91,20	8,20	<5	<4	<60	48,60	<2,2	12,80	4,80			
И19-43/6		790,00	1700,00	210,00	69,00	7,16	5,06	94,50	7,69	16,20	<4	<60	48,80	<2,2	30,50	8,37			
Э18-13	2	1100,00	2100,00	77	61,10	7,21	10,20	110,00	14,80	18,40	1,43	52,70	41,80	1,65	13,50	6,31			
Э18-13/1		1300,00	2500,00	38	60,10	8,00	9,47	130,00	15,40	39,50	3,53	43,80	56,80	1,26	11,40	7,06			
Э18-13/2		1000,00	2500,00	190,00	69,90	7,22	12,90	160,00	16,30	17,20	2,49	39,60	47,40	1,72	14,60	6,54			
Э18-14		1300,00	2600,00	36	75,60	9,33	11,80	140,00	18,50	18,20	3,10	44,20	55,10	1,62	12,80	7,78			
Э18-14/1		1400,00	3400,00	140	55,40	9,08	5,78	140,00	16,40	4,8	2,14	43,40	51,70	2,01	16,00	6,19			
Э18-15		1200,00	3000,00	120	71,90	8,14	10,50	160,00	16,30	29,00	1,91	45,70	54,10	2,22	20,50	11,20			
Э18-15/1		1200,00	3400,00	150	67,40	8,43	8,47	140,00	15,50	26,70	1,72	37,10	54,30	1,09	17,50	8,19			
Э18-15/2		1200,00	2800,00	40	74,70	8,88	16,40	140,00	17,10	46,60	3,86	49,50	65,30	2,31	13,00	7,40			
Э18-15-3		1200,00	2900,00	170	72,70	7,82	10,10	130,00	15,50	45,00	2,68	38,70	55,10	1,46	13,20	5,97			

Примечание. Элементы даны в г/т, I–III по классификации [13].
Note: Elements are given in ppm, I–III according to classification [13].

Таблица 3
Геохимический состав магматических пород
Эвотинского массива по данным ICP-MS

Table 3
Geochemical composition of igneous rocks
of the Evotinsky massif according to ICP-MS data

Элемент	Э18-12	Э18-12/2	Э18-13	Э18-15/2
	Фаза 1		Фаза 2	
Rb	73,27	69,47	84,01	84,24
Sr	871,69	969,54	1176,00	1191,06
Y	9,79	10,02	12,59	14,20
Zr	108,14	127,44	110,76	124,25
Nb	5,74	5,86	6,14	4,67
Cs	2,80	8,28	4,13	9,32
Ba	1862,50	1867,01	1959,22	2202,23
La	11,12	13,80	15,03	21,80
Ce	23,20	28,07	31,47	41,74
Pr	2,73	3,48	3,94	5,19
Nd	11,90	13,54	15,39	22,22
Sm	2,54	2,84	3,18	4,52
Eu	0,38	0,99	0,76	1,20
Gd	2,00	2,97	2,70	4,29
Tb	0,27	0,37	0,40	0,59
Dy	1,65	1,77	2,08	2,72
Ho	0,34	0,36	0,43	0,55
Er	0,90	0,86	1,21	1,30
Tm	0,14	0,18	0,19	0,23
Yb	0,90	1,06	1,20	1,30
Lu	0,14	0,23	0,18	0,21
Hf	2,42	2,97	2,60	2,62
Ta	0,27	0,37	0,32	0,44
Th	2,93	3,99	4,32	6,82
U	0,98	1,58	1,21	2,20
Rb/Sr	0,08	0,07	0,07	0,07
K/Rb	128,75	121,15	111,76	102,80
Ba/Rb	25,42	26,88	23,32	26,14
Ba/La	167,49	135,29	130,35	101,01
Nb/La	0,52	0,42	0,41	0,21
Th/U	2,98	2,52	3,58	3,10
Y/Nb	1,70	1,71	2,05	3,04
La/Nb	1,94	2,35	2,45	4,67
La/Th	3,80	3,46	3,48	3,20
Eu/Eu*	0,51	1,04	0,79	0,83
ΣPЗЭ	58,20	70,52	78,16	107,86

Примечание. Породы Эвотинского массива: фаза 1 – амфиболовые кварцевые сиениты; фаза 2 – амфибол-пироксеновые кварцевые монзониты. По данным ICP MS все значения в г/г; $Eu/Eu^* = EuN/[SmN \times GdN]^{1/2}$.

Note. Rocks of the Evotinsky massif: 1 – amphibole quartz syenites; 2 – amphibole-pyroxene quartz monzonites. According to ICP MS data, all values are in ppm; $Eu/Eu^* = EuN/[SmN \times GdN]^{1/2}$.

350 мкм) с корродированными границами, реже зернами изометричной формы. В CL-изображении (CL – катодOLUMИНЕСЦЕНТНОЕ изображение) в большинстве кристаллов хорошо различаются ядра и каймы (рис. 4).

Центральная часть цирконов – светлые области кристаллов неправильной формы, часто с резко выраженной осцилляционной зональностью и повышенным количеством микровключений. Каймы цирконов имеют более темную окраску с иногда неотчетливо выраженной ростовой осцилляционной зональностью и секториальностью. При этом в CL-изображениях фиксируется, что зональность кайм не конформна зональности ядер.

Выделенный циркон из амфиболовых кварцевых сиенитов (обр. Э18-11) характеризуется гетерогенностью U–Pb изотопной системы: содержания U и Th в ядрах зерен варьируют от 43,8 до 337 и от 6,67 до 321 г/т, тогда как в каймах – от 355 до 2664 и от 19,7 до 870 г/т соответственно. При этом величина Th/U отношения в центральных частях зерен изменяется от 0,16 до 1,20, а в периферийных зонах – от 0,02 до 0,34. По девяти точкам получено конкордантное значение возраста 119 ± 1 млн лет при СКВО конкордантности 0,24 (см. рис. 4).

Акцессорный циркон из амфибол-пироксеновых кварцевых монзонитов обр. Э18-13 имеет сходные геохимические характеристики с цирконом из обр. Э18-11. В каймах зерен содержания U и Th сильно варьируют от 227 до 2590 и от 2,59 до 1851 г/т соответственно. Диапазон значений Th/U отношения в периферийных частях кристаллов изменяется от 0,01 до 0,74. Рассчитанный конкордантный возраст цирконов в их краевых зонах попадает в компактную область значений – 117 ± 1 млн лет (СКВО = 0,71; см. рис. 4).

В ядрах изученных зерен обоих образцов содержания U и Th низкие – в среднем 211 и 112 г/т соответственно. Средняя величина Th/U отношения 0,67. Ядра цирконов отличаются древними значениями U–Pb изотопного возраста: от 1802 до 2843 млн лет (см. табл. 4).

Обсуждение

По классификационным данным [9–11], состав пород ранней фазы варьирует от кварцевых монзонитов до граносиенитов, но с учетом петрографических исследований (преобладание в составе пород калиевого полевого шпата над

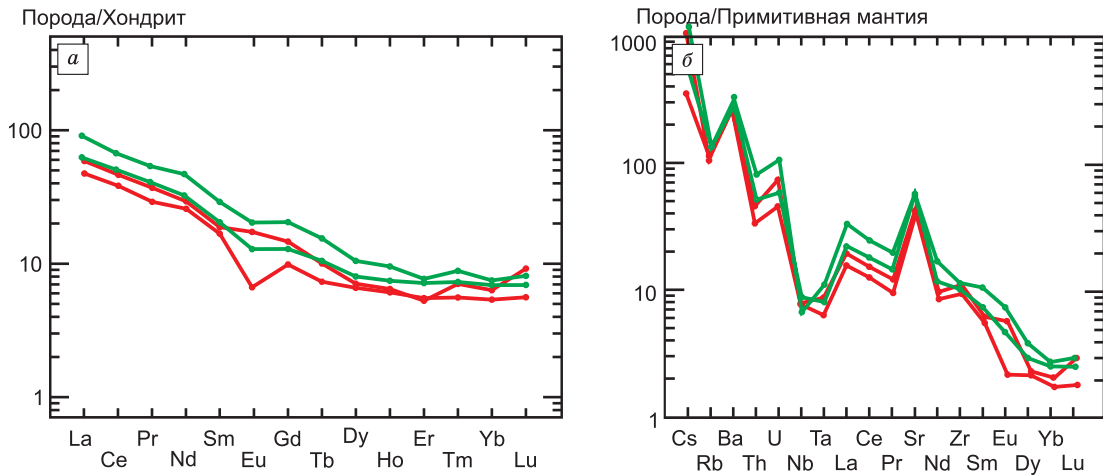


Рис. 3. Спектры распределения редкоземельных элементов (а), нормированных к составу хондрита [16]; редких элементов (б), нормированных к составу примитивной мантии [17] для пород Эвотинского массива. Условные обозначения точек составов пород см. на рис. 2

Fig. 3. Distribution spectra of rare earth elements (а), normalized to the chondrite composition [16]; rare elements (б), normalized to the primitive mantle composition [17] for the rocks of the Evotinsky massif. For the legend of the rock composition points, see Fig. 2

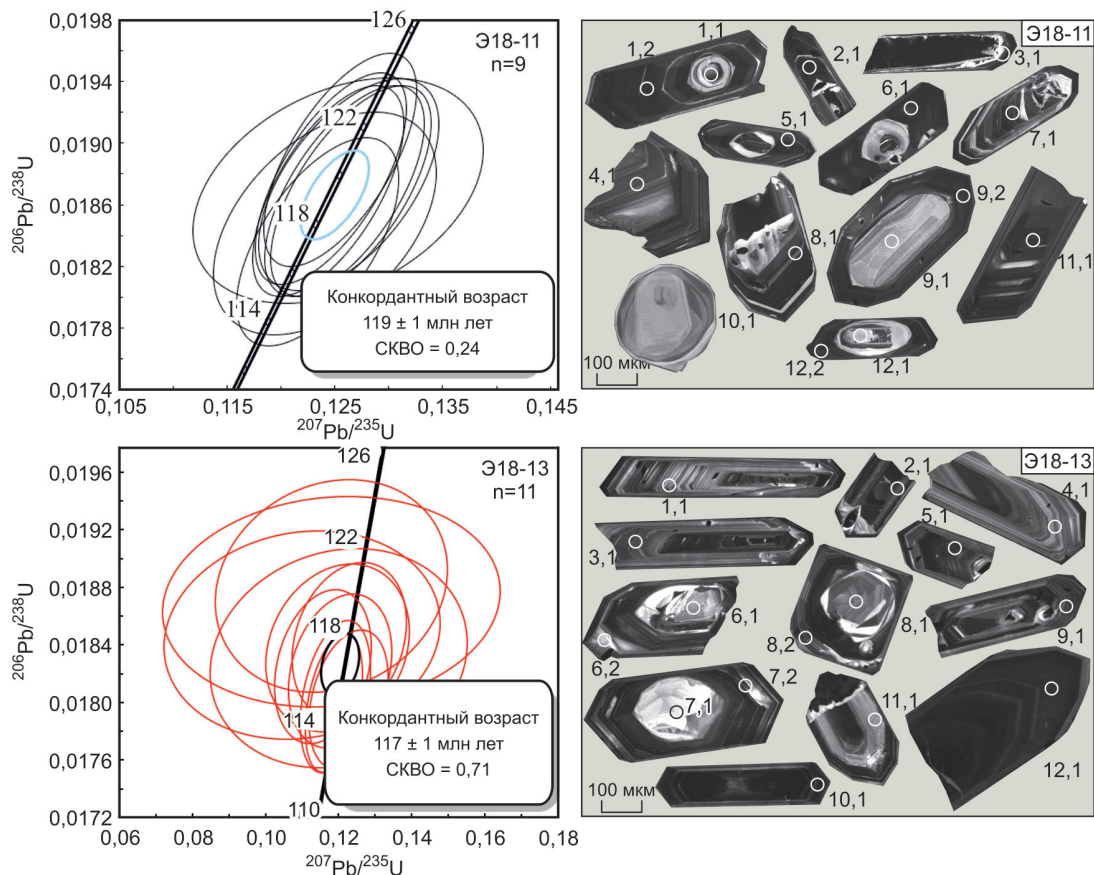


Рис. 4. Диаграммы с конкордиями для магматических пород Эвотинского массива. Справа показаны CL-изображения датированных зерен цирконов с точками определений

Fig. 4. Concordia diagrams for igneous rocks of the Evotinsky massif. CL-images of dated zircon grains with determination points are shown to the right

Таблица 4

Результаты локального (SHRIMP-II) U-Pb анализа циркона из магматических пород Эвотинского массива

Table 4

Results of local (SHRIMP-II) U-Pb analysis of zircon from igneous rocks of the Evotinsky massif

Точка измерения	²⁰⁶ Pb _c , %	Содержание, г/г			²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U±1σ возраст, млн лет	
		U	Th	²⁰⁶ Pb*			
Амфиболовые кварцевые сиениты. Э18-11							
1,1	0,03	337	291	105	0,89	1997	±26
1,2	0	1398	358	22,5	0,26	119	±2
2,1	0,12	2498	56,1	40,3	0,02	120	±2
3,1	1,04	1877	538	36	0,3	141	±2
4,1	0,26	355	19,7	6,11	0,06	127	±2
5,1	0,07	1416	200	22,4	0,15	117	±2
6,1	0	990	137	15,9	0,14	120	±2
7,1	0,19	1096	46,6	17,4	0,04	118	±2
8,1	0,09	2131	93,5	34,6	0,05	121	±2
9,1	0,07	142	88,8	44,3	0,65	2003	±2
9,2	0	1437	159	23,1	0,11	119	±2
10,1	0,1	276	321	81,6	1,2	1903	±3
11,1	0,42	743	107	12	0,15	119	±2
12,1	0,27	43,8	6,67	20,4	0,16	2783	±44
12,2	0,16	2664	870	42,9	0,34	119	±2
Амфибол-пироксеновые кварцевые монцититы. Э18-13							
1,1	0,82	240	2,59	3,91	0,01	120	±2
2,1	0,33	815	28,7	12,8	0,04	116	±1
3,1	0,89	400	14,5	6,49	0,04	120	±2
4,1	0,62	227	4,29	3,59	0,02	117	±2
5,1	0,31	900	36,1	14,2	0,04	117	±1
6,1	0,06	186	126	72,9	0,7	2416	±26
6,2	1,13	337	28,8	5,41	0,09	118	±2
7,1	0,19	154	138	42,9	0,93	1802	±22
7,2	0,24	1331	290	20,6	0,23	115	±1
8,1	0,04	361	61,8	172	0,18	2843	±26
8,2	0,37	640	53,4	10,2	0,09	118	±1
9,1	0,19	1064	272	16,5	0,26	115	±1
10,1	0,2	2590	1851	40,1	0,74	115	±1
11,1	0,12	145	121	42,6	0,86	1901	±21
12,1	0,49	471	12,9	7,47	0,03	117	±2

Примечание. Pb_c и Pb^* – обыкновенный и радиогенный свинец. Ошибки при калибровке стандарта 0,37 % (обр. Э18-11) и 0,45 % (обр. Э18-13) не включены в ошибки определения единичного локального анализа. Коррекция на обыкновенный свинец при расчете возраста произведена по величине измеренного ^{204}Pb .

Note. Pb_c and Pb^* are common and radiogenic lead. Standard calibration errors of 0.37 % (sample E18-11) and 0.45 % (sample E18-13) are not included in the errors of the single local analysis. Correction for common lead in the age calculation was made based on the measured ^{204}Pb .

плагиоклазом, присутствие в составе сиенитов кварца до 10 %, двух разновидностей амфибола до 10 %) мы относим образования первой фазы

к амфиболовым кварцевым сиенитам [7]. Породы второй фазы по этим же параметрам соответствуют амфибол-пироксеновым кварцевым мон-

цонитам. То есть установлен антидромный характер внедрения пород нормальной (прямой) зональности массива [6].

Магматические образования Эвотинского массива по петрохимическому составу отвечают субщелочным породам, характеризуются калиево-натриевым типом щелочности и относятся к высококалиевой известково-щелочной петрохимической серии. По содержанию индикаторных элементов Sr, Ba, концентрациям микроэлементного состава Hf, Yb [15], отношениям La/Yb (>12 [18]) = 12,35–12,99; Ce/Yb (>15 [18]) = 25,78–26,42, а также характерной геохимической специализации на литофильную группу элементов (см. табл. 3) они наиболее близки к производным пород шошонит-латитового ряда [14, 18].

В целом характер распределения микроэлементов в образованиях ранней и поздней фаз идентичен, кроме повышенного содержания всех элементов в поздней фазе, что может говорить о внедрении пород из одного источника, но с контаминацией поздней фазы на заключительной стадии породами первой фазы [19]. Наличие слабой отрицательной Eu-аномалии пород первой фазы массива (Eu/Eu* до 0,51–1,04) и снижение этого показателя к поздней фазе (до 0,79–0,83) (см. табл. 3) может свидетельствовать о формировании первичных мантийных магм при фракционной кристаллизации темноцветных порообразующих минералов [19]. Стоит отметить наименьшую концентрацию P3Э в кварцевых сиенитах до 64,36 г/т, которая увеличивается к кварцевым монцонитам до 93,00 г/т (средние значения), что подтверждает антидромную последовательность внедрения пород массива [19].

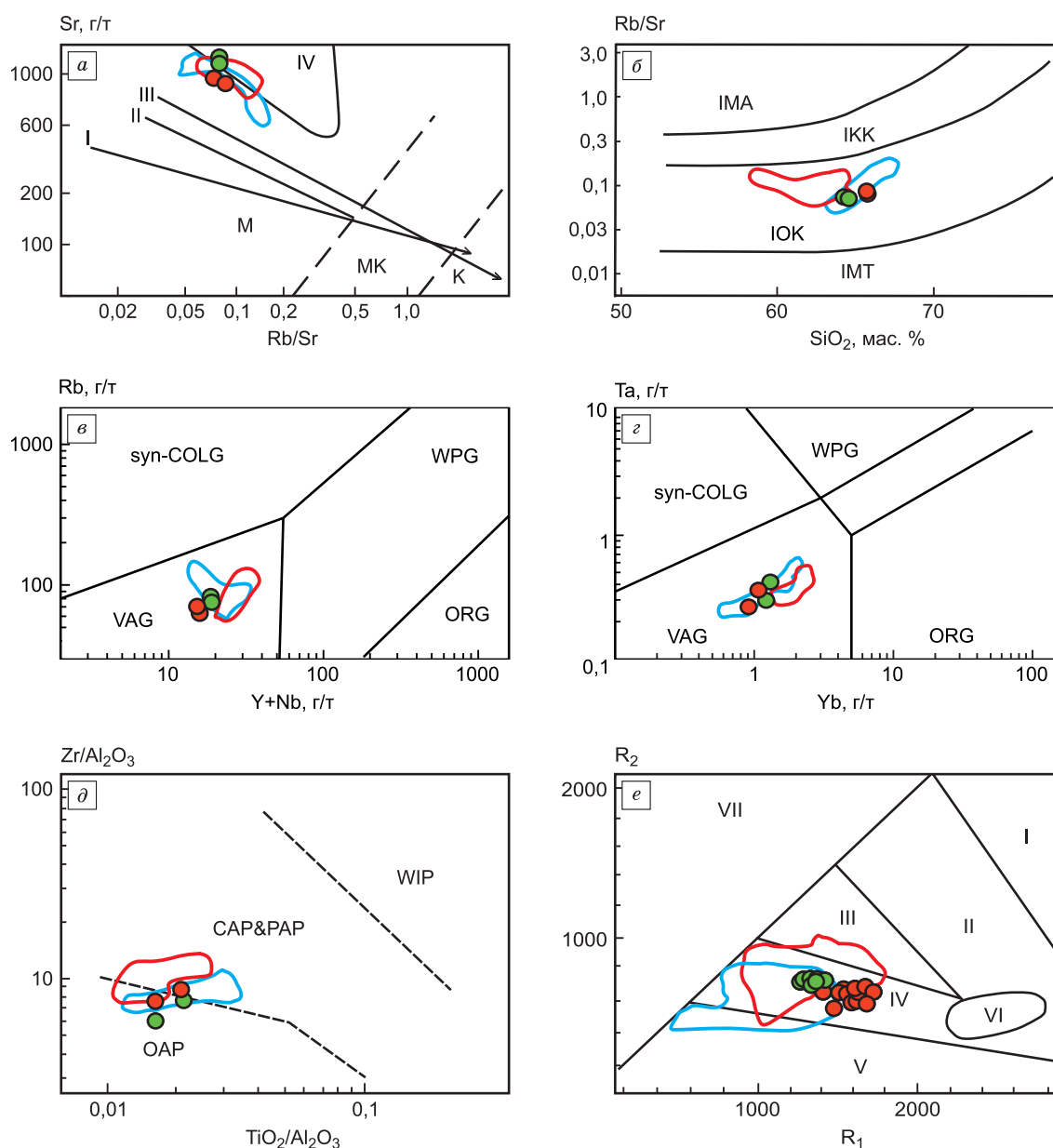
По отношениям Rb/Sr (0,08 [20]) = 0,07–0,08, Ba/Rb (22 [14]) = 23,32–26,88 а также Sr–Rb/Sr [21] (рис. 5, а) все породы массива близки к магматическим образованиям мантийного генезиса. Низкие значения Nb/La (<1 [22]) = 0,21–0,52 и высокие значения Th/U (>2 [22]) = 2,52–3,58 могут указывать на присутствие корового вещества [22]. Высокие показатели отношения Y/Nb ($>1,2$ [18]) = 1,70–3,04 могут отражать вклад как мантийного, так и корового источника с геохимическими характеристиками La/Yb (>12 [18]) = 12,35–12,99, Ce/Yb (>15 [18]) = 25,78–26,42, Ba/La (>3 [23]) = 101,01–167,49, La/Th (1–10 [24]) = 3,46–3,80 магматических пород островных дуг и континентальных окраин [18, 23]. Такой же точки зрения придержи-

ваются А.Я. Кочетков и К.А. Лазебник [25], которые отметили петрохимическую и геохимическую близость пород мезозойских магматических образований алданского комплекса с вулканидами островных дуг.

U–Pb изотопные возрасты в краевых зонах цирконов показали, что формирование Эвотинского массива произошло в относительно короткий промежуток времени – 117–119 млн лет (аптский век), что соответствует заключительному этапу формирования магматизма Алданской мезозойской магматической провинции 150–115 млн лет назад [26]. Ядра цирконов имеют более древние значения U–Pb изотопного возраста – от 1802 до 2843 млн лет. Это свидетельствует, что цирконы с древним возрастом ядер имеют ксеногенную природу и были захвачены расплавом из пород фундамента при кристаллизации Эвотинского массива.

Ранее было высказано мнение об участии субдуцированной океанической коры Монголо-Охотского бассейна в формировании материнских магматических очагов всего алданского комплекса [1, 21]. Результаты изучения магматических пород Эвотинского рудно-россыпного района подтверждают это мнение. По соотношению Rb/Sr–SiO₂ [28] все породы массива относятся к производным магматического очага, генерировавшегося в пределах океанической коры (рис. 5, б). На дискриминантных диаграммах Дж. Пирса [29] Rb–Y+Nb, Ta–Yb и Zr/Al₂O₃–TiO₂/Al₂O₃ [30] (рис. 5, в–д) точки составов пород локализуются в полях производных островных дуг, что присуще надсубдукционным образованиям. В то же время соотношения Sr–Rb/Sr [21] и R₁–R₂ [31] соответствуют породам рифтогенного или позднеорогенного этапа, т. е. формирование массива происходило в условиях растяжения (см. рис. 5, а, е). Возможно, это свидетельствует об образовании пород Эвотинского массива в условиях задугового растяжения на заключительных стадиях закрытия Монголо-Охотского океана. Однако это предположение нуждается в дополнительном подтверждении. Стоит отметить, что подобная обстановка установлена и для других мезозойских массивов Эвотинского рудно-россыпного района, в частности, Медведевского, Таежного и Михайловского (см. рис. 5) [3].

На основе геохимических данных выполнен анализ минерагенического потенциала магматических пород Эвотинского массива. По соотношению в них Fe₂O₃/FeO–Rb [32] породы массива



Составы магматических пород массивов Эвотинского рудного района по [3]

Медведевский Таежный

Рис. 5. Дискриминантные диаграммы для магматических образований Эвотинского массива. *a* – соотношение Sr–Rb/Sr в магматических породах. Поля составов магнеобразующих источников [21]: М – мантийные, МК – мантийно-коровые, К – коровые. Сплошные линии – тренды дифференциации типовых и вулканических серий: I – толеитовая островных дуг, II – известково-щелочная, III – известково-щелочная активных континентальных окраин, IV – рифтовых зон континентов; *б* – Rb/Sr–SiO₂, поля диаграммы [28]: магматические породы: IMT – толеитовой серии, IKK – континентальной коры, IOK – океанической коры, IMA – щелочно-мантийные; *в*, *г* – Rb–Y+Nb и Ta–Yb – поля диаграмм [29]: ORG – граниты океанических хребтов, WPG – внутриплитные граниты, VAG – граниты вулканических дуг, syn-COLG – коллизионные граниты; *д* – диаграмма Zr/Al₂O₃–TiO₂/Al₂O₃ для пород различных геодинамических обстановок по [30]: WIP – внутриплитные, CAP&PAP – окраинно-континентальных и постколлизионных вулканических дуг, OAP – океанических дуг; *е* – R₁–R₂, поля диаграммы [31]: производные: I – мантийных магм, II – доплитной коллизии, III – постколлизионного воздымания, IV – позднеорогенного, V – анорогенного, VI – синколлизийного этапов развития территории, VII – дифференциации щелочных магм. R₁=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti), R₂=6Ca+2Mg+Al

Fig. 5. Discriminant diagrams for igneous formations of the Evotinsky massif. *a* – Sr–Rb/Sr ratio in igneous rocks. Fields of compositions of magma-forming sources [21]: M – mantle, MK – mantle-crustal, K – crustal. Solid lines are trends of differentia-

tion of type and volcanic series: I – tholeiitic of island arcs, II – calc-alkaline, III – calc-alkaline of active continental margins, IV – rift zones of continents; δ – Rb/Sr–SiO₂, fields of diagram [28]: igneous rocks: IMT – tholeiitic series, IKK – continental crust, IOK – oceanic crust, IMA – alkaline-mantle; e , e – Rb–Y+Nb and Ta–Yb – fields of diagrams [29]: ORG – ocean ridge granites, WPG – within-plate granites, VAG – volcanic arc granites, syn-COLG – collision granites; z – Zr/Al₂O₃–TiO₂/Al₂O₃ diagram for rocks of different geodynamic settings according to [30]: WIP – within-plate, CAP&PAP – continental margin and post-collisional volcanic arcs, OAP – oceanic arcs; δ – R₁–R₂, fields of diagram [31]: derivatives: I – mantle magmas, II – pre-plate collision, III – post-collisional uplift, IV – late orogenic, V – anorogenic, VI – syncollisional stages of territory development, VII – differentiation of alkaline magmas. R₁=4Si-11(Na+K)-2(Fe+Ti), R₂=6Ca+2Mg+Al

могут быть специализированы на комплексное Мо–Au–Cu оруденение (рис. 6).

Наиболее изученным золоторудным месторождением аналогичного генезиса в пределах Центрально-Алданского рудного района является Лебединое, оруденение которого связано со скарнами, расположенными на контакте мезозойских субщелочных и щелочных интрузий и карбонатных пород венда–нижнего кембрия [4, 33].

По результатам оценки минерагенического потенциала Эвотинского массива определено, что он специализирован на комплексную Мо–Au–Cu минерализацию (см. рис. 6). В россыпепроявлении р. Эвота, берущей свое начало в пределах Эвотинского массива, нами при шлиховом опробовании было установлено присутствие среднепробного золота [34]. Это позволяет предполагать, что при проведении дальнейших исследований

в Эвотинском массиве может быть обнаружена золотая минерализация.

Закключение

В результате исследований установлено, что в строении Эвотинского массива выделяется две фазы (антидромный характер) внедрения: первая – амфиболовые кварцевые сиениты, вторая – амфибол-пироксеновые кварцевые монцониты. По особенностям петрогеохимических составов породы массива наиболее близки таковым высококальциевой известково-щелочной петрохимической серии, производным шошонит-латитового ряда. Установлен вклад как мантийного, так и корового источников при формировании массива, а также выявлены черты сходства составов фаз Эвотинского массива с вулканитами окраинно-континентальных и островных дуг. U-Pb (циркон,

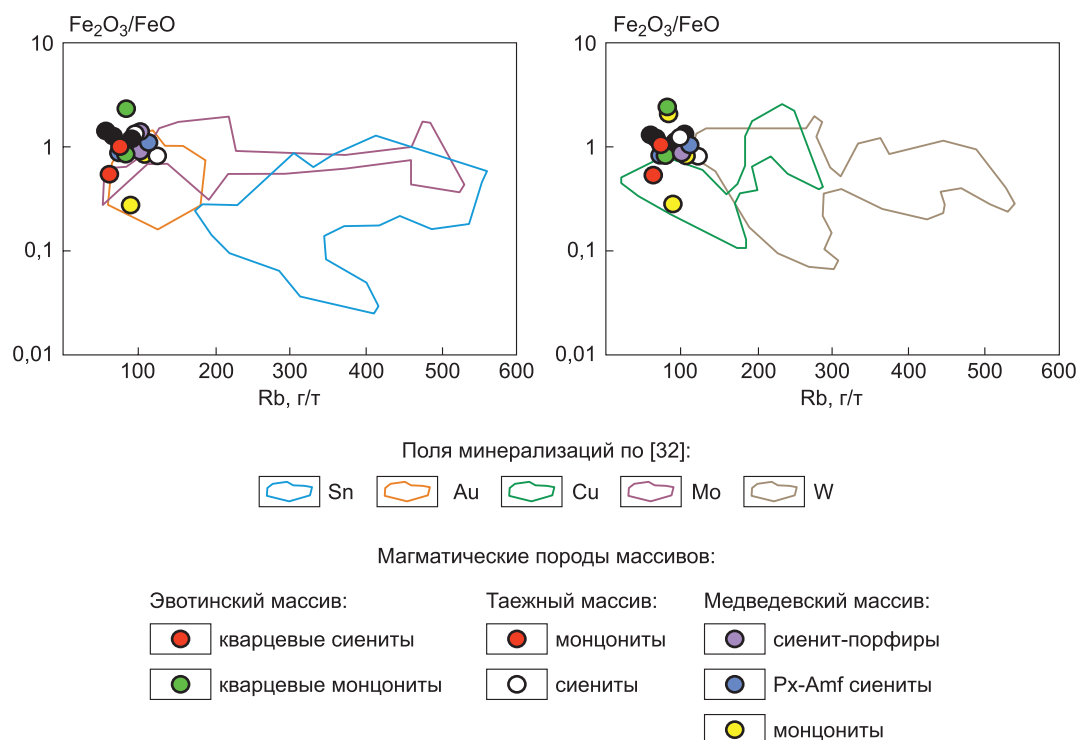


Рис. 6. Положение точек составов магматических пород Эвотинского рудного узла на диаграмме Fe₂O₃/FeO–Rb [32]

Fig. 6. Position of composition points of igneous rocks of the Evotinsky ore cluster on the Fe₂O₃/FeO–Rb diagram after [32]

SHRIMP-II) возраст кристаллизации пород массива варьирует от 119 ± 1 (амфиболовые кварцевые сиениты) до 117 ± 1 млн лет (амфибол-пироксеновые кварцевые монциты) – аптский век, что соответствует заключительному этапу формирования Алданской мезозойской магматической провинции. При их внедрении происходило плавление раннедокембрийских пород Алдано-Станового щита с возрастом 1802–2843 млн лет. Высказано предположение об образовании пород Эвотинского массива в условиях задугового растяжения на заключительных стадиях закрытия Монголо-Охотского океана, как и других массивов Эвотинского рудно-россыпного района (Медведевского, Тажного и Михайловского). На основании анализа минерогенического потенциала пород установлено, что магматические образования Эвотинского массива перспективны на обнаружение золоторудной минерализации.

Список литературы / References

1. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). Отв. редакторы: д.г.-м.н. Л.М. Парфенов, чл.-корр. РАН М.И. Кузьмин. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика»; 2001. 571 с.
Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia). Responsible editors: doctor of geological and mineralogical sciences L.M. Parfenov, corresponding member of the Russian Academy of Sciences M.I. Kuzmin. Moscow: MAIK «Nauka/Interperiodika»; 2001. 571 p. (In Russ.)
2. Молчанов А.В., Терехов А.В., Шатов В.В. и др. Золоторудные районы и узлы Алдано-Становой металлогенической провинции. *Региональная геология и металлогения*. 2017;(71):93–111.
Molchanov A.V., Terekhov A.V., Shatov V.V., et al. Gold ore districts and ore clusters of the Aldanian metallogenic province. *Regional Geology and Metallogeny*. 2017;(71):93–111. (In Russ.)
3. Ivanov A.I., Loskutov E.E., Ivanov M.S., Zhuravlev A.I. Petrography, geochemical features and absolute dating of the mesozoic igneous rocks of Medvedev and Tazhniy Massifs (Southeast Russia, Aldan Shield). *Minerals*. 2022;12(12):1516 <https://doi.org/10.3390/min12121516>
4. Кравченко А.А., Смелов А.П., Березкин В.И., Попов Н.В. Геология и генезис докембрийских золотоносных метабазитов центральной части Алдано-Станового щита (на примере месторождения им. П. Пинигина). Якутск: ООО РИЦ «Офсет»; 2010. 148 с.
Kravchenko A.A., Smelov A.P., Berezkin V.I., Popov N.V. *Geology and genesis of Precambrian gold-bearing metabasites of the central part of the Aldan-Stanovoy shield (P. Pinigin deposit)*. Yakutsk: Offset; 2010. 148 p. (In Russ.)
5. Амарский В.Г. О связи рудообразования и магматизма (на примере Эвотинского района Алданского щита). *Известия ЗФГО СССР*. 1971;7(2):11–18.
Amarsky V.G. The connection between ore formation and magmatism (Evotinsky district of the Aldan shield). *News of the TB of the GC of the USSR*. 1971;7(2):11–18. (In Russ.)
6. Vigneresse J.L. The role of discontinuous magma inputs in felsic magma and ore generation. *Ore Geology Reviews*. 2007;30(3–4):181–216. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.03.001>
7. Богатиков О.А., Морозов А.Ф., Петров О.В. *Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования*. СПб.: ФГБУ «ВСЕГЕИ»; 2009. 160 с.
Bogatikov O.A., Morozov A.F., Petrov O.V. *Petrographic Code of Russia. Magmatic, metamorphic, metasomatic, impact formations*. Saint-Petersburg: VSEGEI; 2009. 160 p. (In Russ.)
8. Шарпенюк Л.Н. *Практическая петрология: методические рекомендации по изучению магматических образований применительно к задачам госгеолкарт*. СПб.: ФГБУ «ВСЕГЕИ»; 2017. 168 с.
Sharpenok L.N. *Practical petrology: methodological recommendations for the study of igneous formations in relation to the tasks of state geological maps*. Saint-Petersburg: VSEGEI; 2017. 168 p. (In Russ.)
9. Wilson M. *Review of igneous petrogenesis: A global tectonic approach*. London.: Unwin Hyman; 1989. 466 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6788-4>
10. Middlemost E.A. *Magma and magmatic rocks. an introduction to igneous petrology*. London, New-York.: Longman; 1985. 266 p.
11. De la Roche H., Leterrier J., Grandclaude P., Marchal M. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1–R2-diagram and major-element analyses – Its relationships with current nomenclature. *Chemical Geology*. 1980;29(1):183–210. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(80\)90020-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(80)90020-0)
12. Whitford D.J., Nicholls I.A., Taylor S.R. Spatial Variations in the geochemistry of quaternary lavas across the Sunda arc in Java and Bali. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1979;70:341–356. <https://doi.org/10.1007/BF00375361>
13. Goldschmidt V.M. *Geochemistry*. Oxford: Oxford University Press; 1954. 730 p.
14. Таусон Л.В. *Геохимические типы и потенциальная рудоносность гранитоидов*. М.: Наука; 1977. 280 с.
Tauson L.V. *Geochemical types and potential ore-bearing capacity of granitoids*. Moscow: Nauka; 1977. 280 p. (In Russ.)
15. Pearce J.A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe R.S. (ed.) *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. New York: Wiley; 1982, pp. 525–548.
16. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society. Special Publications*. 1989;42(1):313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
17. McDonough W.F., Sun S.-S., Ringwood A.E., et al. Potassium, rubidium and cesium in the Earth and Moon and the evolution of the mantle of the Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1992;56(3):1001–1012. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90043-I](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90043-I)
18. Eby G.N. The A-Type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis. *Lithos*. 1990;26(1–2):115–134. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(90\)90043-Z](https://doi.org/10.1016/0024-4937(90)90043-Z)
19. Балашов Ю.А. *Геохимия редкоземельных элементов*. М.: Наука; 1976. 267 с.
Balashov Yu.A. *Geochemistry of rare earth elements*. Moscow: Nauka; 1976. 267 p. (In Russ.)
20. Whalen J.B., Kenneth L., Currie K.L., Chappel B.W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1987;95(2):603–632. <https://doi.org/10.1007/BF00402202>

21. Даценко В.М. Петрогеохимическая типизация гранитоидов юго-западного обрамления Сибирской платформы. В кн.: *Петрография на рубеже XXI века: итоги и перспективы: материалы Второго Всероссийского петрографического совещания, г. Сыктывкар, 27–30 июня 2000 г.* Сыктывкар: Институт геологии Коми НЦ УРО РАН; 2000. С. 270–274.
- Datsenko V.M. Petrogeochemical typification of granitoids of the southwestern framing of the Siberian Platform. In: *Petrography at the turn of the 21st century: Results and prospects: Proceedings of the Second All-Russian Petrographic Conference, Syktivkar, June 27–30, 2000.* Syktivkar: Institute of Geology of the Komi Scientific Center URO RAS; 2000, pp. 270–274. (In Russ.)
22. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. *Континентальная кора, ее состав и эволюция.* М.: Мир; 1988. 380 с.
- Taylor S.R., McLennan S.M. *Continental crust, its composition and evolution.* Moscow: Mir Publ.; 1988. 380 p. (In Russ.)
23. Arculus R.J., Powell R. Source component mixing in the regions of arc magma generation. *Journal of Geophysical Research.* 1986;91:5913–5926. <https://doi.org/10.1029/JB091iB06p05913>
24. Туркина О.М. *Лекции по геохимии магматического и метаморфического процессов: учеб. пособие.* Новосибирск: ИИЦ НГУ; 2014. 118 с.
- Turkina O.M. *Lectures on geochemistry of magmatic and metamorphic processes: a tutorial.* Novosibirsk: Novosibirsk State University. 2014. 118 p. (In Russ.)
25. Кочетков А.Я., Лазебник К.А. Щелочные ультрабазиты и базиты Якокутского массива (Центральный Алдан). В кн.: Ковальский В.В. и др. (ред.) *Геохимия и минералогия базальтов и ультрабазитов Сибирской платформы.* Якутск: ЯФ СО АН СССР; 1984. С. 62–82.
- Kochetkov A.Y., Lazebnik K.A. Alkaline Ultrabasic and Basic Rocks of Yakokut Massif (Central Aldan). In: Kovalsky V.V., et al. (eds.) *Geochemistry and Mineralogy of Basalts and Ultrabasites of Siberian Platform.* Yakutsk: YaF AS USSR; 1984, pp. 62–82. (In Russ.)
26. Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Ponomarchuk A.V., et al. U-Pb SIMS and Ar-Ar geochronology, petrography, mineralogy and gold mineralization of the late Mesozoic Amga alkaline rocks (Aldan shield, Russia). *Ore Geology Reviews.* 2019;109:520–534. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.05.011>
27. Великославинский С.Д., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. и др. U-Pb-возраст федоровской толщи Алданского гранулитогнейсового мегакомплекса (Алданский щит). *Доклады РАН.* 2003;393(1):91–96.
- Velikoslavinsky S.D., Kotov A.B., Sal'nikova E.B., et al. The U-Pb age of the Fedorov sequence of the Aldan granulite-gneiss megacomplex, the Aldan shield. *Doklady Earth Sciences.* 2003;393(8):1151–1155.
28. Tischendorf G., Pälchen W. Zur Klassifikation von Granitoiden. *Zeitschrift fuer Geologische Wissenschaften.* 1985;13: 615–627.
29. Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology.* 1984;25:956–983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
30. Müller D., Rock N.M.S., Groves D.I. Geochemical discrimination between shoshonitic and potassic volcanic rocks in different tectonic settings: A pilot study. *Mineralogy and Petrology.* 1992;46:259–289. <https://doi.org/10.1007/BF01173568>
31. Batchelor R.A., Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chemical Geology.* 1985;48(1-4):43–55. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(85\)90034-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(85)90034-8)
32. Blevin P.L., Chappell B.W. The role of magma sources, oxidation states and fractionation in determining the granite metallogeny of eastern Australia. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh.* 1992;83(1-2): 305–316. <https://doi.org/10.1017/s0263593300007987>
33. Максимов Е.П., Уютов В.И., Никитин В.М. Центрально-Алданская золото-урановорудная магматогенная система (Алдано-Становой щит, Россия). *Тихоокеанская геология.* 2010;29(2):3–26.
- Maximov E.P., Nikitin V.M., Uyutov V.I. The Central Aldan gold-uranium ore magmatogenic system, Aldan-Stanovoy shield, Russia. *Russian Journal of Pacific Geology.* 2010;4(2):95–115.
34. Журавлев А.И., Никифорова З.С., Кравченко А.А. и др. Минералогическо-геохимические особенности самородного золота из россыпей Эвотинского золотоносного района (Южная Якутия). В кн.: *Байкальская молодежная научная конференция по геологии и геофизике: Материалы VI Всероссийской молодежной научной конференции, посвященной памяти академика Н.Л. Добрецов, г. Улан-Удэ – Горячинск, 23–27 августа 2021 г.* Улан-Удэ: БНЦ СО РАН; 2021. С. 49–51. <https://doi.org/10.31554/978-5-7925-0604-6-2021-49-51>
- Zhuravlev A.I., Nikiforova Z.S., Kravchenko A.A., et al. Mineralogical and geochemical features of native gold from placers of the Evotinsky gold-bearing region (South Yakutia). In: *Baikal youth scientific conference on geology and geophysics: Proceedings of the 6th All-Russian youth scientific conference dedicated to the memory of academician N.L. Dobretsov, Ulan-Ude – Goryachinsk, August 23–27, 2021.* Ulan-Ude: BSC SB RAS. 2021, pp. 49–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.31554/978-5-7925-0604-6-2021-49-51>

Об авторах

ИВАНОВ Мичил Спартакович, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-0204-1653>, ResearcherID: AAL-7447-2021, Scopus Author ID: 57212410522, SPIN: 6254-7142, e-mail: ivanov.michil@bk.ru

ИВАНОВ Алексей Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5485-3127>, ResearcherID: JBR-7954-2023, Scopus Author ID: 57674640500, SPIN: 7715-0867, e-mail: aiivanov@diamond.ysn.ru

ЖУРАВЛЕВ Анатолий Иванович, младший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-0115-5146>, ResearcherID: AAC-6095-2019, Scopus Author ID: 57200217371, SPIN: 1793-5956, e-mail: ai.zhuravlevgeo@gmail.com

ЛОСКУТОВ Евгений Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-7491-1067>, ResearcherID: AAO-4823-2021, Scopus Author ID: 57205150102, SPIN: 3030-3370, e-mail: Loskutov@diamond.ysn.ru

КРАВЧЕНКО Александр Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-9767-6610>, Scopus Author ID: 15750892800, SPIN: 1760-7705, e-mail: freshrock@yandex.ru

М. С. Иванов и др. ♦ Вещественный состав и U-Pb возраст магматических пород Эвотинского массива...

ГУЗЕВ Владислав Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий геолог, <https://orcid.org/0000-0003-3288-7999>, Scopus Author ID: 57355951700, SPIN: 4056-7413, e-mail: lector10@mail.ru

ТЕРЕХОВ Артем Валерьевич, кандидат геолого-минералогических наук, зав. отделом, <https://orcid.org/0000-0003-2001-1391>, Scopus Author ID: 57215378338, SPIN: 7531-5674, e-mail: artem_terekhov@vsegei.ru

Вклад авторов

Иванов М.С. – разработка концепции, методология, проведение исследования, верификация данных, создание черновика рукописи, редактирование рукописи; **Иванов А.И.** – разработка концепции, методология, проведение исследования, верификация данных, создание черновика рукописи, редактирование рукописи; **Журавлев А.И.** – методология, проведение исследования, верификация данных, создание черновика рукописи, редактирование рукописи; **Лоскутов Е.Е.** – проведение исследования, верификация данных, создание черновика рукописи, редактирование рукописи; **Кравченко А.А.** – разработка концепции, проведение исследования; **Гузов В.Е.** – методология, проведение исследования, создание черновика рукописи; **Терехов А.В.** – методология, создание черновика рукописи, редактирование

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

IVANOV, Michil Spartakovich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-0204-1653>, ResearcherID: AAL-7447-2021, Scopus Author ID: 57212410522, SPIN: 6254-7142, e-mail: ivanov.michil@bk.ru

IVANOV, Alexey Ivanovich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5485-3127>, ResearcherID: JBR-7954-2023, Scopus Author ID: 57674640500, SPIN: 7715-0867, e-mail: aiivanov@diamond.ysn.ru

ZHURAVLEV, Anatolii Ivanovich, Junior Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-0115-5146>, ResearcherID: AAC-6095-2019, Scopus Author ID: 57200217371, SPIN: 1793-5956, e-mail: ai.zhuravlevgeo@gmail.com

LOSKUTOV, Evgeniy Evgenievich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-7491-1067>, ResearcherID: AAO-4823-2021, Scopus Author ID: 57205150102, SPIN: 3030-3370, e-mail: Loskutov@diamond.ysn.ru

KRAVCHENKO, Alexander Alexandrovich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-9767-6610>, Scopus Author ID: 15750892800, SPIN: 1760-7705, e-mail: freshrock@yandex.ru

GUZEV, Vladislav Evgenievich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Leading Geologist, <https://orcid.org/0000-0003-3288-7999>, Scopus Author ID: 57355951700, SPIN: 4056-7413, e-mail: lector10@mail.ru

TEREKHOV, Artem Valerievich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Head of Department, <https://orcid.org/0000-0003-2001-1391>, Scopus Author ID: 57215378338, SPIN: 7531-5674, e-mail: artem_terekhov@vsegei.ru

Authors' contribution

Ivanov M.S. – conceptualization, methodology, investigation, validation, writing – original draft, writing – review & editing; **Ivanov A.I.** – conceptualization, methodology, investigation, validation, writing – original draft, writing – review & editing; **Zhuravlev A.I.** – conceptualization, methodology, investigation, validation, writing – original draft, writing – review & editing; **Loskutov E.E.** – investigation, validation, writing – original draft, writing – review & editing; **Kravchenko A.A.** – conceptualization, investigation; **Guzev V.E.** – conceptualization, investigation, writing – review & editing; **Terekhov A.V.** – methodology, writing – original draft, writing – review & editing

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 14.11.2024

Поступила после рецензирования / Revised 30.10.2025

Принята к публикации / Accepted 18.11.2025