

**VLADIMIRSKOE DEPOSIT (EASTERN SAYAN): AGE OF DYKE COMPLEXES
AND LOCALIZATION FEATURES OF GOLD MINERALIZATION**

E.V. Airiyants ¹✉, **B.T. Nharara** ^{1,2}, **O.N. Kiseleva** ¹, **D.K. Belyanin** ^{1,2}, **P.A. Roschektaev**¹,
A.V. Travin ¹, **S.M. Zhmodik** ¹

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

² Novosibirsk State University, 2 Pirogov St, Novosibirsk 630090, Russia

ABSTRACT. The Vladimirscoe deposit is one of the largest gold ore deposits in the southeastern part of the Eastern Sayan. This work is devoted to the localization of mineralized zones and the determination of the formation time of gold mineralization.

The geological and structural analysis has shown that second-order discontinuous disturbances accompanied by zones of beresitization, calcification, sulfidization and dyke bodies are the main ore-controlling structures of gold mineralization. For the first time, the age of rocks of dyke complexes and ore mineralized zones of the deposit has been established by ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating methods.

KEYWORDS: Eastern Sayan; Vladimirscoe gold deposit; dyke complexes; mineralized zones; ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating

FUNDING: The research is the part of the state assignment of IGM SB RAS (№ 122041400193-7).

**RESEARCH ARTICLE**

Correspondence: Evgenia V. Airiyants, jenny@igm.nsc.ru

Received: November 28, 2022

Revised: March 3, 2023

Accepted: March 14, 2023

FOR CITATION: Airiyants E.V., Nharara B.T., Kiseleva O.N., Belyanin D.K., Roschektaev P.A., Travin A.V., Zhmodik S.M., 2023. Vladimirscoe Deposit (Eastern Sayan): Age of Dyke Complexes and Localization Features of Gold Mineralization. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (4), 0710. doi:10.5800/GT-2023-14-4-0710

МЕСТОРОЖДЕНИЕ ВЛАДИМИРСКОЕ (ВОСТОЧНЫЙ САЯН): ВОЗРАСТ ДАЙКОВЫХ КОМПЛЕКСОВ И ОСОБЕННОСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ

Е.В. Айриянц¹, Б.Т. Нарара^{1,2}, О.Н. Киселева¹, Д.К. Белянин^{1,2}, П.А. Рощектаев¹,
А.В. Травин¹, С.М. Жмодик¹

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

² Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

АННОТАЦИЯ. Месторождение Владимирское является одним из крупных золоторудных месторождений в юго-восточной части Восточного Саяна. Данная работа посвящена вопросам структурного контроля жильно-прожилковых золоторудных минерализованных зон и определению времени формирования золотого оруденения.

В результате геолого-структурного анализа установлено, что разрывные нарушения второго порядка, сопровождаемые зонами березитизации, окварцевания, сульфидизации, как и дайковые тела, являются основными рудоконтролирующими структурами золотого оруденения. Впервые методом ⁴⁰Ar/³⁹Ar датирования установлен возраст пород дайковых комплексов и рудных жильно-прожилковых зон месторождения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Восточный Саян; Владимирское золоторудное месторождение; дайковые комплексы; минерализованные зоны; ⁴⁰Ar/³⁹Ar датирование

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН (№ 122041400193-7).

1. ВВЕДЕНИЕ

Юго-восточная часть Восточного Саяна представляет собой территорию, сформировавшуюся в условиях многоэтапной покровной тектоники и тектономагматической переработки автохтонных и надвинутых на них аллохтонных океанических, островодужных и окраинно-морских террейнов, а также амальгамации аккреционно-коллизонных и постколлизонных магматических комплексов, возникших при открытии и последующем закрытии окраинных структур Палеоазиатского океана (ПАО) [Dobretsov, Ignatovich, 1988, 1989; Fedotova, Khain, 2002; Gordienko et al., 2021; и др.]. В геолого-металлогеническом отношении данная территория входит в состав Окинского рудного района, который подразделяется на четыре структурно-металлогенических зоны (СМЗ): Ильчирскую, Гарганскую, Окинскую и Хойтоокинскую. Наиболее крупные промышленно значимые месторождения и рудопроявления золота (Зун-Холбинское, Пионерское, Барун-Холбинское, Зун-Оспинское и др.) располагаются в пределах Гарганской СМЗ в Урик-Китойской золоторудной зоне [Feofilaktov, 1968; Konnikov et al., 1995; Mironov, Zhmodik, 1999; Roschektaev et al., 2004; Seminsky, Buzov, 2007; Damdinov, 2019]. Гарганская СМЗ занимает центральное положение в районе и представляет собой Гарган-Бутугольский антиклинорий широтного простирания [Gordienko et al., 2016]. Основной его макроструктурной единицей является Гарганский блок (глыба) Тувино-Монгольского палеомикроконтинента, представляющий собой выступ неархейского кристаллического фундамента. Фундамент Гарганского блока сложен древнейшими метаморфическими породами – гранитогнейсами, мигматитами, амфиболитами

и кристаллическими сланцами [Sengör, Natal'in, 1996; Buslov et al., 2001; Dobretsov et al., 2004], организованными в гранитогнейсовые купола [Salop, 1960], и разделен на серию тектонических блоков, преобразованных мощными зонами расщепления и диафореза в купола-штампы [Korol'kov, 2007]. Установлено, что возраст наиболее древних метаморфических преобразований тоналит-трондьемит-гранодиоритовой ассоциации Гарганского блока составляет 2664 ± 15 млн лет [Kovach et al., 2004]. Последние определения возраста подтвердили, что процессы кристаллизации протолитов биотит-амфиболовых тоналитовых гнейсов и их метаморфизма протекали в узком интервале времени – 2727 ± 6 млн лет [Anisimova et al., 2009]. Фундамент несогласно перекрыт чехлом сложнодислоцированных рифейских отложений иркутской свиты и ильчирской толщи, относящихся к шельфовым отложениям пассивной окраины [Roschektaev et al., 2004; Letnikova et al., 2001; Korol'kov, 2007]. Офиолитовые покровы (аллохтоны) фиксируют крупные надвиговые зоны, которые в основном обрамляют Гарганский блок с севера и юга субширотными поясами. Северный представлен Дунжугурским островодужно-офиолитовым покровом. Южный (Ильчирский) пояс сложен тектоническими покровами и клиппами океанических серпентинизированных гипербазитов, кумулятивных и расслоенных габброидов [Dobretsov et al., 1992; Kiseleva, Zhmodik, 2017; Kiseleva et al., 2020; Gordienko et al., 2021]. U-Pb возраст детритовых цирконов в вулканогенно-осадочном аккреционном комплексе Дунжугурского массива характеризуется широким возрастным диапазоном – от 1048 ± 12 до 844 ± 8 млн лет с преобладанием значений 950–830 млн лет [Kuzmichev, Larionov, 2013; Sklyarov

et al., 2016]. Офиолитовые покровы состоят из мантийных перидотитов, пород кумулятивного комплекса, разрезов габброидов, дайковых комплексов долеритов и базальтовых подушечных лав с осадочными толщами флишевого типа, перекрывающими верхнюю часть офиолитового массива [Dobretsov et al., 1992; Kuzmichev et al., 2001; Khain et al., 2002; Kuzmichev, 2015; Sklyarov et al., 2016].

Важным элементом геологического строения Гарганской СМЗ являются гранитоиды, которые относятся к неопротерозойскому сумсунурскому диорит-тоналит-плагиогранитному комплексу с возрастом 785 ± 11 млн лет [Kuzmichev, 2004]. Субвулканические породы представлены многочисленными дайками мета-базальтов, метадолеритов, реже – андезибазальтовых порфириров, а также породами кислого состава: фельзитами, андезит-дацитами, кварц-плагиоклазовыми порфиритами [Tsygankov et al., 2003; Korol'kov, 2007]. Предыдущими исследователями установлена генетическая связь золоторудных месторождений в юго-восточной части Восточного Саяна с активной магматической деятельностью в неопротерозое – венде, нижнем и среднем палеозое [Feofilaktov, 1970; Gordienko et al., 2016; Damdinov et al., 2020]. Дайковые комплексы в ряде работ рассматриваются как рудоконтролирующие структуры [Globa, 1963; Gonerger, Roschektaev, 2012; и др.]. На данный момент эти комплексы недостаточно изучены, для большинства из них отсутствуют сведения об изотопном возрасте даек. В разное время выделялось несколько магматических дайковых комплексов на этой территории [Rasskazov, 1993; Sklyarov et al., 2003; Ilyasova et al., 2010; Kucherenko, 2015; и др.]; однако до сих пор не существует единой классификационной системы дайковых комплексов в пределах Окинского рудного района.

На месторождении Владимирском золотое оруденение, распространенное в пределах Гарганского блока, представлено золото-кварц-полисульфидными жилами, которые локализуются в зонах метасоматических изменений в гранитогнейсах, связанных с разрывными нарушениями и системами дайковых комплексов. В данной работе рассмотрены геолого-структурные и петрографические характеристики дайковых комплексов и особенности локализации золоторудных жил и минерализованных зон месторождения Владимирского, приводятся результаты геохронологического исследования пород месторождения.

2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

При создании схемы геологического строения Владимирского месторождения были использованы результаты предыдущих исследований [Gordienko et al., 2016; Seminsky et al., 2014], данные структурного картирования, предоставленные ООО «Рифей», результаты полевых исследований, спутниковый снимок местности Google Earth. Коллекции образцов дайковых комплексов, руд и вмещающих пород месторождения Владимирского для петрографического и минералогического

исследования были отобраны из эксплуатационных штолен в полевые сезоны 2015–2018 гг. Аналитические исследования выполнены в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН. Химический состав пород определен методом РФА на спектрометре ARL-9900XP, ThermoFisher Scientific (Швейцария); петрографическое исследование пород выполнено на микроскопе AxioScope.A1, Zeiss; состав и микроструктурные особенности минералов изучались на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3 LMU (Tescan Ltd) с системой микроанализа INCA Energy 450+ XMax 80 (Oxford Instruments Ltd). Содержание золота и серебра в породах и рудах, а также микроэлементный состав (Cu, Zn, Pb, Ni, Co, Ti, Mn, V, Cd) пород определены химико-атомно-абсорбционным методом на приборе Solar M6 (Thermo Electron Corporation) с Зеемановской и дейтериевой коррекцией фона, с пределами обнаружения 10^{-7} %.

Возраст пород определен по слюдам $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом датирования [Travin et al., 2009]. Навески мономинеральных фракций проб совместно с мусковитом МСА-11 (возраст 311.0 ± 1.5 млн лет) использовали в качестве монитора и калибровали по международным стандартным образцам биотита LP-6 и мусковита Bern-4 M [Baksi et al., 1996], заворачивали в алюминиевую фольгу, помещали в кварцевую ампулу, запаянную после откачки воздуха. Кварцевые ампулы с пробами облучались в кадмиевом канале ядерного реактора ВВР-К в Физико-техническом институте Томского политехнического института. Градиент нейтронного потока не превышал 0.5 % в размере образца. Эксперименты по ступенчатому прогреву проводились в кварцевом реакторе с печью внешнего нагрева. Холостой опыт по ^{40}Ar и ^{36}Ar (10 мин при 1200°C) не превышал 3×10^{-10} и 0.003×10^{-10} нсм³ соответственно. Очистка аргона выполнялась с помощью ZrAl-SAES-геттеров. Изотопный состав аргона измерялся на масс-спектрометре Noble gas 5400 фирмы Микромасс (Великобритания). Ошибки измерений соответствуют интервалу $\pm 1\sigma$. Для учета вклада мешающих изотопов аргона, образовавшихся на изотопах ^{40}Ca , ^{42}Ca и ^{40}K , были использованы следующие коэффициенты: $^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}} = 0.001279 \pm 0.000061$, $^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar}_{\text{Ca}} = 0.000613 \pm 0.000084$ и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}_{\text{K}} = 0.0191 \pm 0.0018$. Для расчета возраста методом плато использовалась программа Isoplot-4.15 [Ludwig, 2012].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. Геология месторождения и локализация минерализованных зон

Золоторудное месторождение Владимирское находится в пределах Гарганского блока, который сложен метаморфическими породами: плагиогнейсами, биотитовыми и роговообманково-биотитовыми, амфиболитовыми сланцами и мигматитами. На площади месторождения преимущественно распространены мусковит-альбит-кварцевые и эпидот-мусковит-плагиоклаз-кварцевые плагиогнейсограниты. Это светлые зеленовато-серые породы, с мелко- и среднезернистой

структурой и слабовыраженной гнейсовидной текстурой. Минеральный состав представлен кварцем, плагиоклазом (альбитом-олигоклазом), эпидотом, хлоритом и серицитом. Породы основания Гарганского блока в южной части несогласно перекрываются карбонатными мезопротерозойскими отложениями иркутской свиты [Kuznetsov et al., 2010, 2018] и породами ильчирской толщи среднего рифея [Damdinov, 2018]. Иркутская свита представлена четырьмя литоциклами, начинающимися с гравелитов и песчаников, которые сменяются темно-серыми алевросланцами и слюдяными сланцами, затем массивными карбонатными породами: толстослоистыми мраморизованными известняками и доломитами [Semeikin et al., 2006]. Породы иркутской свиты проявляются в южной и восточной части месторождения (рис. 1). Их мощность не превышает 230–300 м. Ильчирская толща сложена вулканогенно-осадочными метаморфизованными отложениями с отдельными олистостромовыми горизонтами и черносланцевыми пачками.

Гипабиссальные породы на месторождении представлены многочисленными дайками. На основании геолого-структурных, петрографических и петрохимических характеристик в пределах месторождения установлено два типа даек, относящихся к различным магматическим комплексам. Первый комплекс представлен мощными порфировыми крутопадающими дайками основного состава, распространенными на всей площади месторождения, меридионального простирания, согласующегося с направлением субмеридиональных разрывных нарушений. Дайки имеют четко выраженные структуры течения магмы, проявленные в ориентированном расположении порфировых выделений и лейст полевого шпата в основной массе. Протяженность даек может достигать нескольких километров, а мощность доходит до 100 м. В юго-западной части месторождения дайки секут системой разрывных нарушений второго порядка, но без видимого смещения даек. Второй комплекс – это мелкие дайки среднего и кислого состава, северо-западного и северо-восточного простирания. Дайки отмечаются в юго-восточной и центральной части участка. Длина даек не превышает 750 м, мощность – меньше 20 м. Они секут дайки первой группы. Ориентировка контактов даек, гнейсовидности и зон рассланцевания иногда совпадает, но чаще всего дайки под острым углом пересекают гнейсовидность.

Разрывные нарушения образуют несколько систем. Система разломов первого порядка представлена нарушениями субмеридионального простирания в виде правосторонних сдвигосбросов (азимут простирания 320–360°, угол падения 30–60°) [Seminsky et al., 2014]. Такие субмеридиональные зоны разломов сопровождаются характерными системами трещин. К этой системе приурочены наиболее мощные дайки долеритов и порфиритов первого дайкового комплекса. Система разломов второго порядка представлена двумя разделяемыми группами разломов.

Первая группа – эта система разрывных нарушений северо-западного простирания, представленная преимущественно левосторонними сбрососдвигами (угол падения от 30 до 80°, азимут падения 45–70°) [Buzov, 2009; Seminsky et al., 2014]. Они образуют кулисообразную сеть, которая протягивается вдоль бортов основного хребта участка. Интенсивность проявления разрывных нарушений на площади участка различна. В юго-западной части участка они более мощные. В северо-восточной части они ослабевают, превращаясь в систему ориентированной трещиноватости, протяженность которой частично ограничена субмеридиональными порфировыми дайками (первый дайковый комплекс). По своей природе разрывные нарушения представляют собой зоны «горячих» (вязких) разломов, выраженные участками рассланцевания мощностью от первых метров до десятков и даже до первых сотен метров [Gordienko et al., 2016]. Другая группа разломов второго порядка представлена правыми сдвигосбросами северо-северо-восточного простирания. Угол падения плоскостей сместителя данной системы варьируется от 45 до 80°, азимут падения – от 120 до 160° [Buzov, 2009; Seminsky et al., 2014].

Обе вышеописанные системы разломов второго порядка сопровождаются развитием минерализованных зон с интенсивной метасоматической проработкой, представленной березитизацией и пропицитизацией, сопровождающейся окварцеванием, сульфидизацией, хлоритизацией, карбонатизацией, с которыми связана рудная минерализация (рис. 2). Рудная минерализация локализуется в кварц-сульфидных и кварц-карбонат-полисульфидных жилах (мощность от 2–3 до 50 см) и в виде рассеянной вкрапленности в березитах. Содержание сульфидов в жилах в среднем составляет 3–5%. Рудные минералы представлены преимущественно минералами золотополисульфидной стадии (пирит, халькопирит, пирротин, галенит, сфалерит, самородное золото), а также разнообразными Ag-Pb-Bi-Te-S минералами более поздней золотосульфосольной стадии. Содержание золота в рудах достигает 150 г/т.

Мощность самих минерализованных зон составляет от первых метров до 20–25 м, увеличиваясь до 70 м, особенно в местах пересечения с крупными меридиональными разломами и связанными с ними дайками основного состава первого комплекса. Протяженность зон варьируется от 500 до 1750 м и более. Минерализованные зоны наиболее интенсивно проявлены в центральной части месторождения. В основном они простираются в северо-западном (реже в северо-северо-восточном) направлении вдоль разрывных нарушений второго порядка. Протяженность минерализованных зон зависит от их местонахождения в пределах месторождения. По отношению к золотому оруденению выделяются дайки первого комплекса – дорудные. Они частично экранируют формирование минерализованных зон в северной части, но это явление не прослеживается в южной части месторождения, где разрывные нарушения более интенсивны и секут дайковые тела.

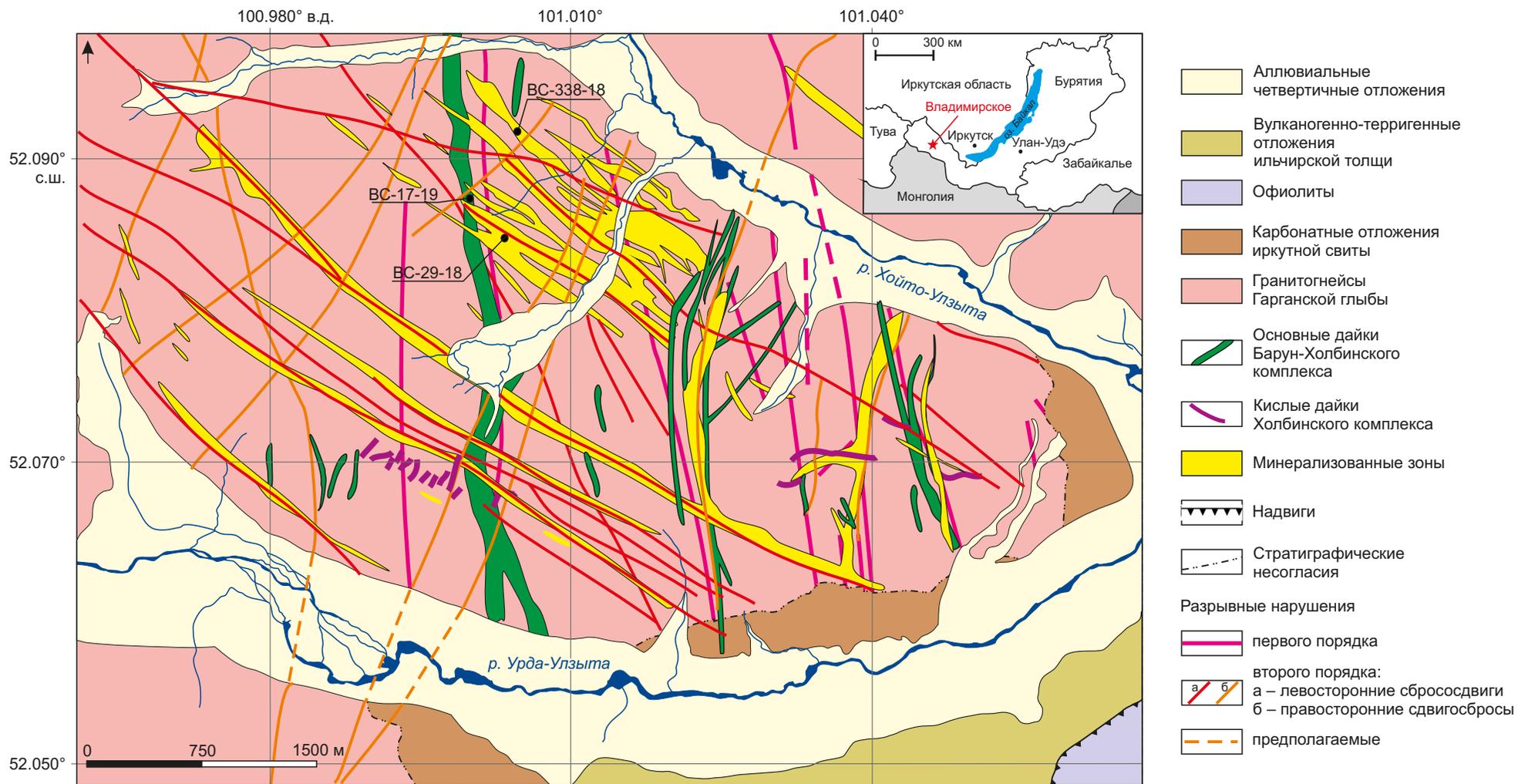


Рис. 1. Геологическая схема месторождения Владимирского, построенная с использованием литературных данных [Seminsky et al., 2014; Gordienko et al., 2016].

Fig. 1. Geological scheme of the Vladimirskoe deposit, constructed using published data [Seminsky et al., 2014; Gordienko et al., 2016].

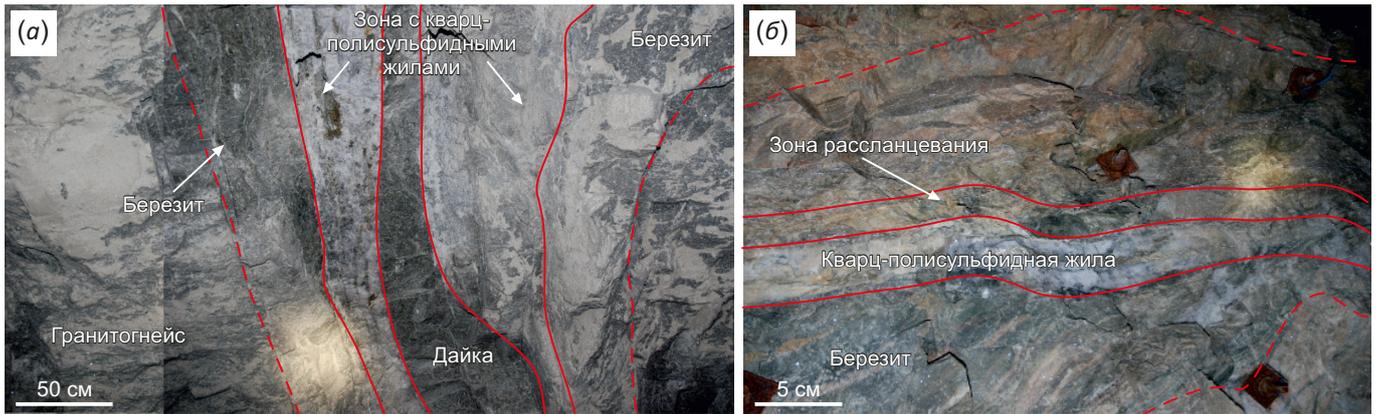


Рис. 2. Фотографии минерализованных зон. (а) – взаимоотношение пород дайки, березитов и зоны интенсивной метасоматической проработки (хлоритизация, серицитизация и т.п.) с кварц-полисульфидными жилами; (б) – развитие минерализованной зоны вдоль разрывного нарушения.

Fig. 2. Photographs of mineralized zones. (а) – relationship between dyke rocks, beresite and the zone of intense hydrothermal-metasomatic alteration with quartz-sulfide veins; (б) – development of a mineralized zone along a fault.

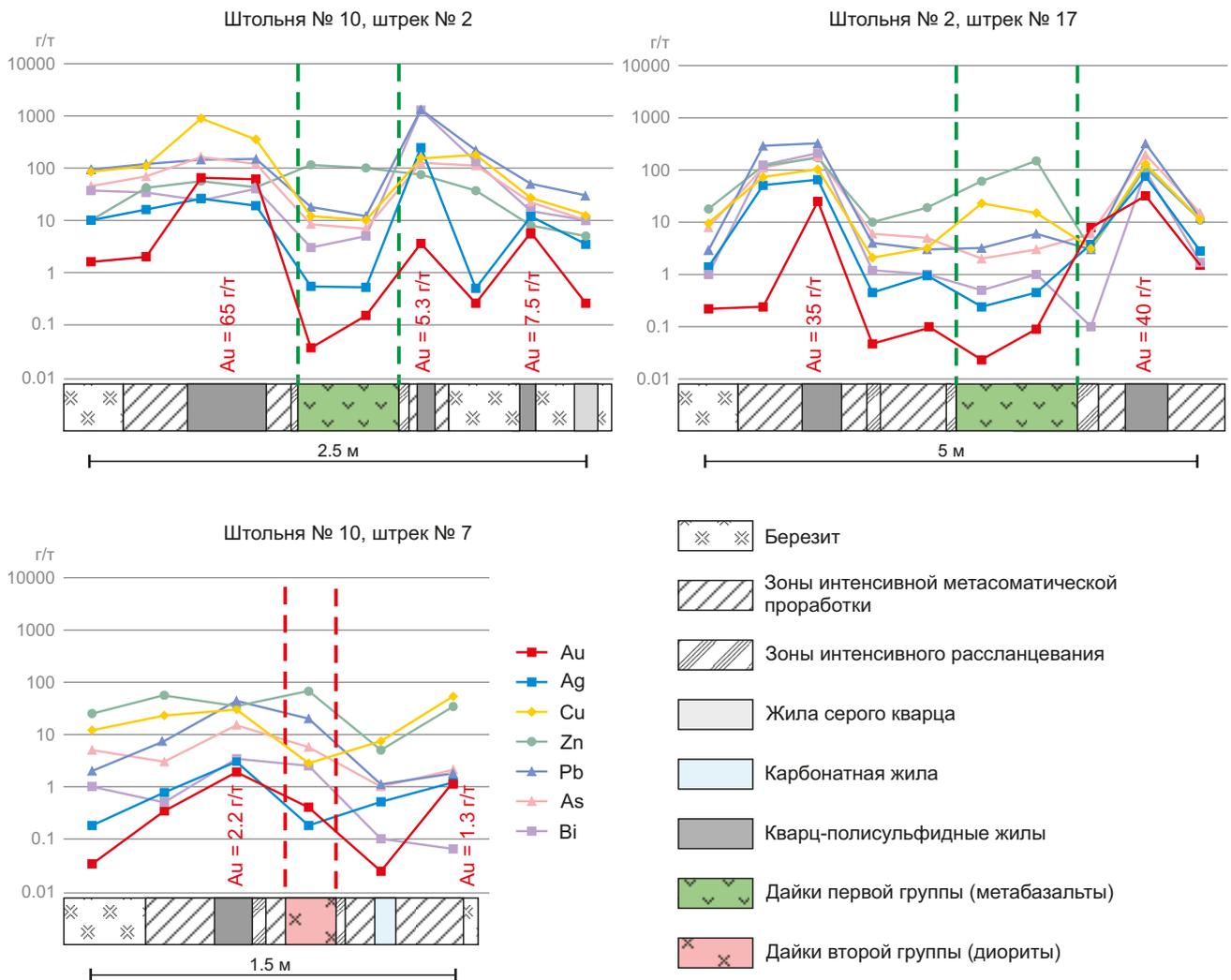


Рис. 3. Распределение золота и рудных компонентов в разрезе вкрест простирания дайковых тел.

Fig. 3. Distribution of gold and other ore components in the cross section of the strike of dykes.

Это подтверждается и аналитическими данными распределения основных рудных компонентов (рис. 3). Горные породы дайкового комплекса подвергаются частичной метасоматической проработке (сульфидизация, хлоритизация и т.п.).

Четких картин взаимоотношения минерализованных зон и менее распространенных даек второго комплекса не выявлено (они скорее внутрирудные). Направление развития минерализованных зон и ориентировка

даек совпадают и согласуются с разрывными нарушениями второго порядка. Вдоль границы дайковых тел наблюдается хлоритизация и серицитизация. Дайки слабосульфидизированны.

3.2. Петрографические особенности дайковых комплексов

Дайки первого комплекса представляют собой массивные темно-зеленого цвета породы основного состава

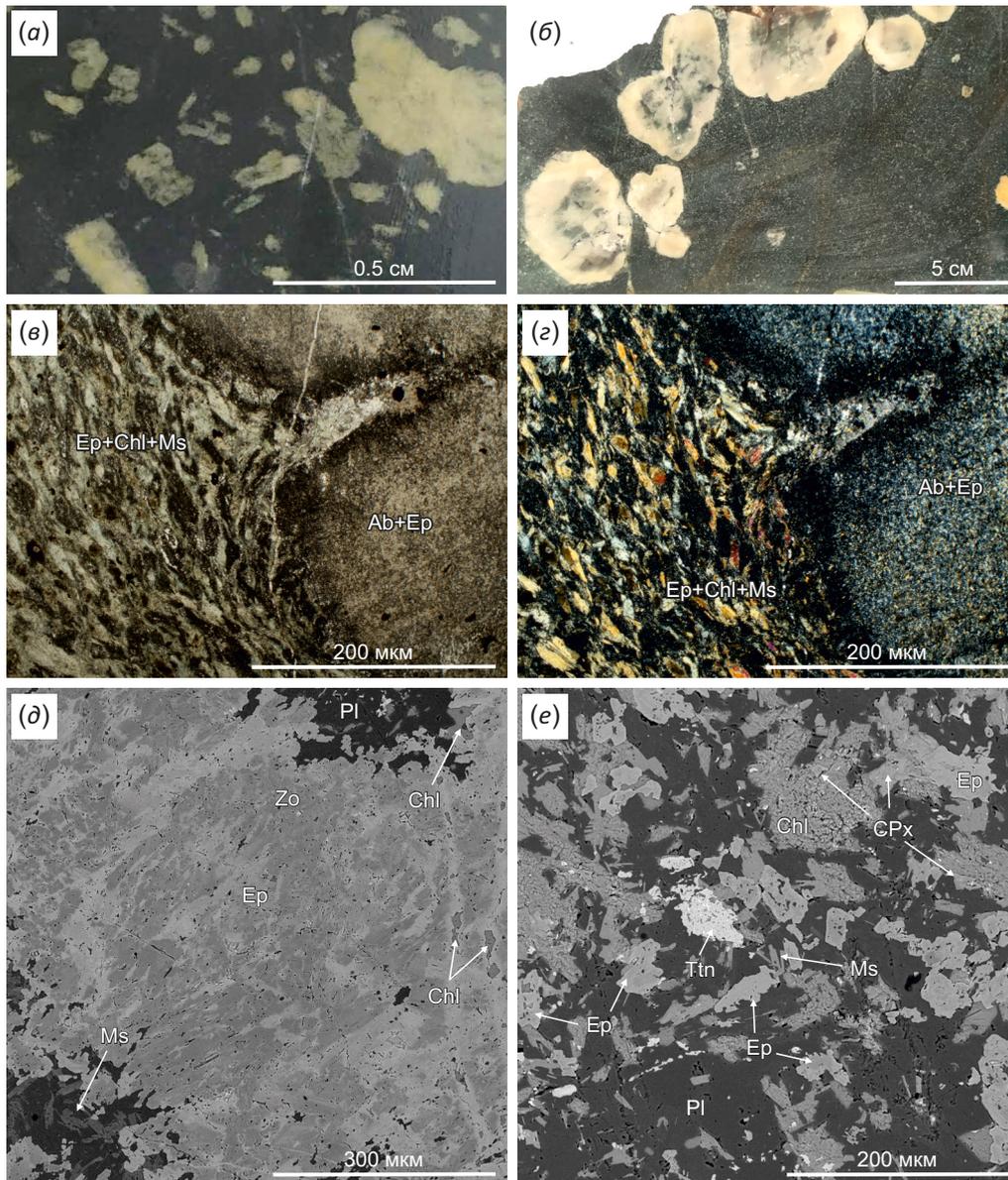


Рис. 4. Фотографии образцов породы первого дайкового комплекса: (а) – мелкопорфировый метадолерит, (б) – крупнопорфировый метадолерит. Микрофотографии шлифов (в, г): порфировые вкрапленники измененного плагиоклаза в мелкозернистой основной массе, (в – николи ||, г – николи ×). Снимки СЭМ: (д) – порфировый вкрапленник плагиоклаза, почти нацело замещенный эпидотом и цоизитом; (е) – плагиоклаз-хлорит-эпидотовая основная масса, микролиты пироксена замещены хлоритом. Pl – плагиоклаз, Ab – альбит, Ms – мусковит, Chl – хлорит, Ep – эпидот, Zo – цоизит, Ttn – титанит.

Fig. 4. Photographs of rock samples from the first dyke complex: (а) – fine porphyritic metabasite porphyrite, (б) – diabase porphyrite. Optical photomicrographs of diabase porphyrite in cross- (в) and plane-polarized light (г): porphyritic phenocrysts of altered plagioclase in a fine-grained groundmass. SEM images: (д) – porphyry inclusions of plagioclase almost completely replaced by epidote and zoisite; (е) – plagioclase-chlorite-epidote bulk, pyroxene microliths replaced with chlorite. Pl – plagioclase, Ab – albite, Ms – muscovite, Chl – chlorite, Ep – epidote, Zo – zoisite, Ttn – titanite.

с порфировыми вкрапленниками различного размера (рис. 4; Прил. 1, табл. 1.1). Они представлены метадолеритами и метамикрогаббро. Структура породы порфировая; структура основной массы мелкозернистая, микролепидогранобластовая. Благодаря ориентированному расположению фенокристов и микролитов основной массы иногда наблюдается флюидальная текстура, указывающая на течение кристаллизующейся магмы. Порфировые вкрапленники представлены преимущественно вкрапленниками измененного плагиоклаза, превращенного в альбит-эпидот-цоизитовый агрегат, с сохранением габитуса кристаллов. Основная

масса сложена мелкозернистым агрегатом клинопироксена (диопсид-геденбергитовый ряд), эпидота различной железистости вплоть до цоизита, железистого хлорита, альбита и мусковита (рис. 4, д, е).

Ко второму дайковому комплексу относятся менее распространенные рассланцованные дайки среднего, кислого состава северо-западного и северо-восточного простирания. Они представлены гранодиоритами, реже – кварцевыми порфировыми диоритами (рис. 5; Прил. 1, табл. 1.1). Породы имеют массивную текстуру и полнокристаллическую, гипидиоморфную мелкозернистую структуру. Породы сложены идиоморфным

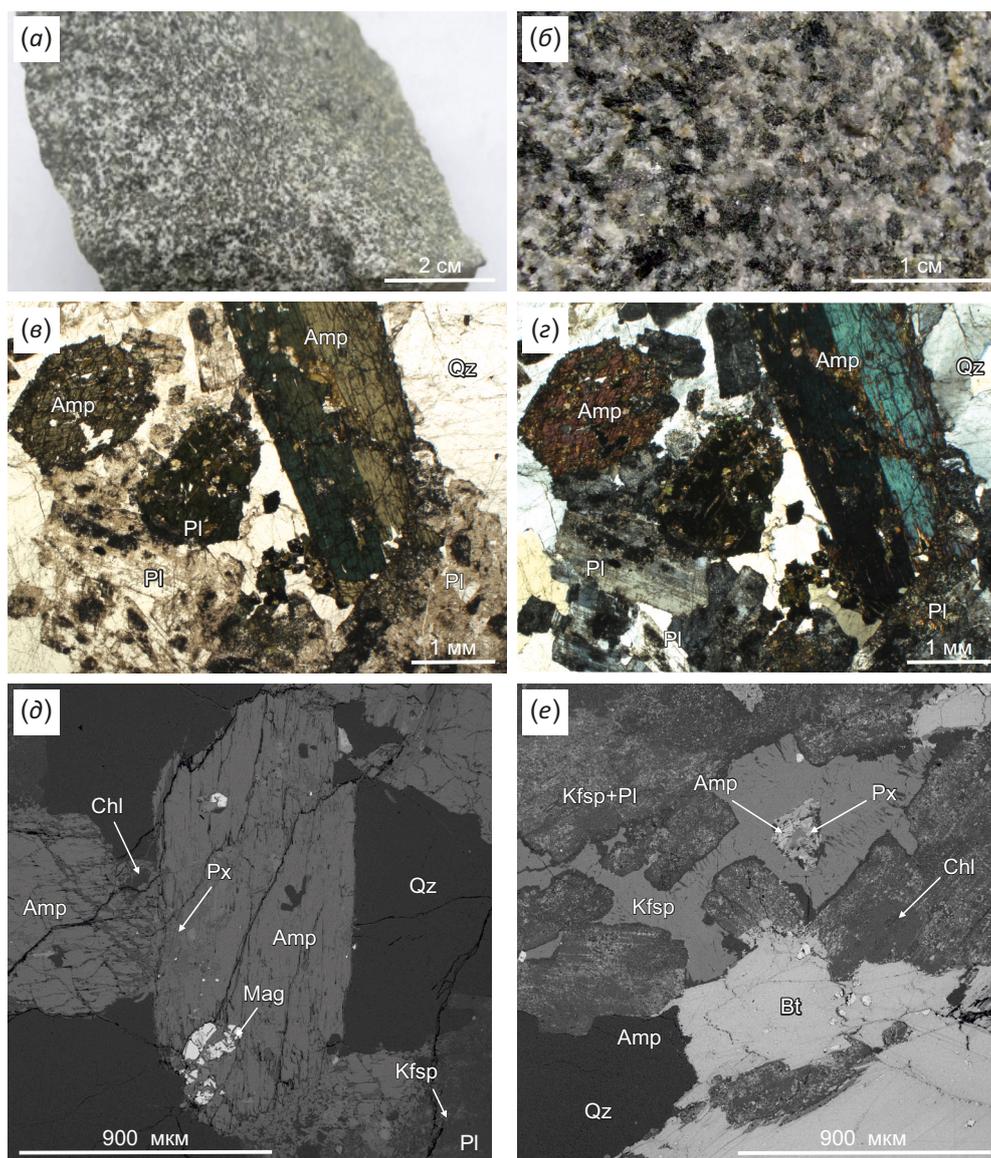


Рис. 5. Фотографии образцов второго дайкового комплекса: (а) – мелкозернистый диорит, (б) – роговообманковый гранодиорит. Микрофотографии шлифов (в, г): гипидиоморфная структура гранодиорита с крупными идиоморфными зернами амфибола, ((в) – николи ||, (г) – николи ×). Снимки СЭМ: (д) – крупные зерна амфибола; (е) – срастание биотита и плагиоклаза. Pl – плагиоклаз, Kfsp – КПШ, Amp – амфибол, Bt – биотит, Qz – кварц, Chl – хлорит, Mag – магнетит.

Fig. 5. Photos of rock samples from the second dyke complex: (а) – fine-grained andesite, (б) – dacite. Optical photomicrographs in cross- (в) and plane-polarized light (г): hypidiomorphic structure of andesite with large idiomorphic amphibole grains. SAM images: (д) – large amphibole grains; (е) – intergrowth of biotite and plagioclase. Pl – plagioclase, Kfsp – KPSH, Amp – amphibole, Bt – biotite, Qz – quartz, Chl – chlorite, Mag – magnetite.

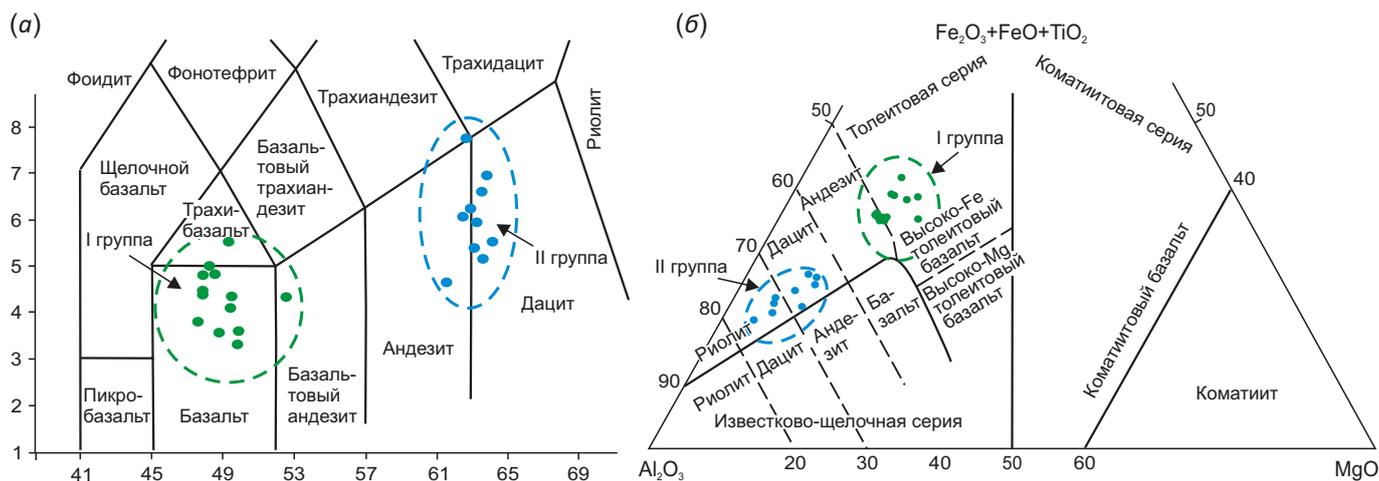


Рис. 6. Соотношения петрогенных элементов в породах дайковых комплексов: (а) – TAS диаграмма [Le Bas et al., 1986]; (б) – диаграмма Дженсена [Jensen, 1976].

Fig. 6. The ratio of petrogenic elements in rocks of dyke complexes: (а) – TAS diagram [Le Bas et al., 1986]; (б) – Jensen diagram [Jensen, 1976].

амфиболом, гипидиоморфным биотитом и аллотриаморфными плагиоклазом, КПШ, кварцем. Полевые шпаты изменены: КПШ пелитизирован, плагиоклаз сосюритизирован. В биотите встречаются микровключения титанита. Вторичные минералы представлены хлоритом, эпидотом, титанитом, акцессорные минералы – апатитом, магнетитом, ильменитом, цирконом.

Петрохимические исследования подтверждают существование двух групп гипабиссальных пород, которые относятся к различным магматическим комплексам. На TAS диаграмме составы пород первой группы соответствуют базальтам, а второй – андезитам, дацитам (рис. 6, а). Поскольку породы частично изменены в результате метаморфизма, для разделения пород толейтовой и известково-щелочной серий применялась диаграмма Дженсена [Jensen, 1976] (рис. 6, б). Согласно диаграмме Дженсена дайки обеих групп относятся к толейтовой серии, для которой характерен тренд обогащения железом. Для пород первой группы содержание FeO_{tot} колеблется от 12 до 18 % мас. %, MgO – от 4 до 10 мас. %. Содержание Al_2O_3 менее изменчиво и остается относительно постоянным – 14–16 мас. %. Для пород второй группы содержания FeO_{tot} составляют 4.0–8.5 мас. %, Al_2O_3 – 16–21 мас. % при незначительном разбросе значений MgO (1.7–3.8 мас. %).

3.3. Результаты $^{40}Ar/^{39}Ar$ датирования дайковых комплексов и минерализованных зон

В юго-восточной части Восточного Саяна по данным предыдущих исследователей выделялись несколько различных дайковых комплексов (Прил. 1, табл. 1.2). Для типизации выделенных дайковых комплексов и корреляции их с известными выделяемыми в Восточном Саяне магматическими системами, а также для определения их роли при формировании золоторудной минерализации месторождения были выполнены изотопно-геохронологические исследования.

Результаты определения возраста пород дайковых комплексов и метасоматизированных минерализованных зон $^{40}Ar/^{39}Ar$ методом ступенчатого прогрева приведены на рис. 7 и в Прил. 1, табл. 1.3.

По мусковиту из дайки метадолерита (обр. ВС-17-19, навеска 177.07 мг), относящегося к выделенному первому дайковому комплексу, получен возрастной спектр, в средней части которого выделяется кондиционное плато, характеризующееся значением возраста 799 ± 11 млн лет (рис. 7). Поскольку мусковит не является первично-магматическим, данная датировка отражает возраст вторичного изменения датированной породы. Следовательно, возраст образования даек основного состава относительно более древний, возможно средне-, раннеопротерозойский – NP_2 - NP_1 . Этот результат близок к данным, полученным для даек габброидов барун-холбинского палеовулканического комплекса [Roschektaev, Gonerger, 2012; Gordienko et al., 2016]. Возрастные датировки, а также особенности петрографических и петрохимических характеристик позволяют отнести породы первого дайкового комплекса, установленного на месторождении, к барун-холбинскому комплексу.

По биотиту из гранодиоритовой дайки (обр. ВС-29-18, навеска 106.54 мг) наблюдается дискордантный спектр, лишь в низкотемпературной части которого выделяется промежуточное плато из трех ступеней, характеризующееся значением 428 ± 7 млн лет (рис. 7). Такой результат не позволяет уверенно говорить о возрасте формирования гранодиоритовой дайки; полученное значение скорее коррелируется с датировками пород риолит-дацитовый дайковой серии холбинского комплекса (Прил. 1, табл. 1.2).

Для определения возраста формирования минерализованных зон была использована мономинеральная проба серицита (обр. ВС-338а-18, навеска 145.3 мг). В спектре образца выделилось вполне кондиционное

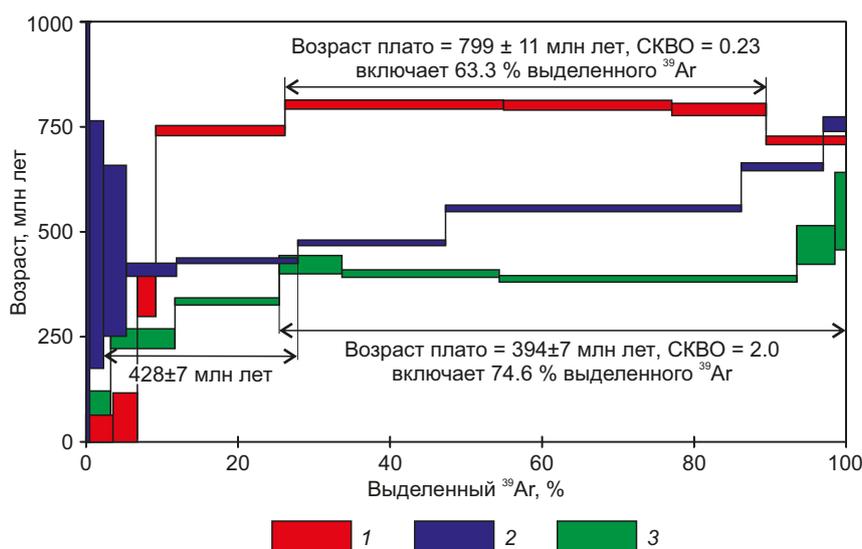


Рис. 7. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования слюд пород дайковых комплексов и минерализованной зоны.

1 – спектр для метадолеритовой дайки (по мусковиту), 2 – для дацитовой дайки (по биотиту), 3 – для метасоматизированной породы из минерализованной зоны месторождения Владимирского (по серициту).

Fig. 7. Results of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of mica from rocks of dyke complexes and mineralized zone.

1 – spectrum for metadolerite dike (muscovite), 2 – for dacite dike (biotite), 3 – for metasomatized rock from the mineralized zone of the Vladimirskoe deposit (sericite).

плато, характеризующееся значением возраста 394 ± 7 млн лет (рис. 7).

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Формирование Владимирского золоторудного месторождения определялось длительной историей геологического развития и трансформации структурно-вещественных комплексов Восточного Саяна в различных геодинамических обстановках. В развитии региона выделяется четыре возрастных этапа [Kuzmichev, 2004; Zhmodik et al., 2006]: раннебайкальский океанический – 1000–800 млн лет, позднебайкальский островодужный (субдукционный, островодужный) – 800–600 млн лет, раннекаледонский аккреционно-коллизионный (коллизионно-субдукционный) – 600–400 (650–490) млн лет и герцинский рифтогенный (400–280 (420–300) млн лет). Наибольшее влияние на рудообразование в регионе оказала активная вулканическая деятельность в неопротерозое, нижнем и верхнем палеозое, связанная с островодужным и плюмовым магматизмом, вызванным субдукционными процессами и трансформацией слэбов в пределах реконструированных активных окраин [Gordienko et al., 2016; Damdinov, 2018].

В интервале 830–800 млн лет в пределах краевого океанического бассейна возникает спрединговая зона и формируется Ехэ-Шигна-Шишхидская зона субдукции [Zhmodik et al., 2022], которая приводит к формированию Шишхидгольской энсиматической островной дуги (800 ± 2.6 млн лет, U-Pb метод по циркону) [Kuzmichev, Larionov, 2011] и Окинской аккреционной призмы от 819 ± 17 до 775 ± 8 млн лет назад [Kuzmichev, Larionov, 2013], формирующейся в результате субдукции под Тувино-Монгольский микроконтинент (Гарганский

блок). При ослаблении или замедлении процессов субдукции дополнительный перенос тепла осуществляют спрединговые струи и/или мантийные плюмы [Dobretsov, 2020]. Вероятно, с этими процессами и связано формирование базитовых даек, которые внедрились в основание Гарганского блока. В результате прорыва дайками пород Гарганского блока вместе с потоками флюидов произошла масштабная проработка и трансформация вулканических структур, кремнистых и черносланцевых горизонтов ильчирской толщи, всех членов офиолитовой ассоциации и пород основания Гарганского блока [Gordienko et al., 2016]. Это сопровождалось процессами ремобилизации и переотложения золота. Подобные слабозолотоносные дайки габбро-диабазов с возрастом 829.9 ± 7.1 млн лет ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) обнаружены ранее на Барун-Холбинском и Владимирском месторождениях [Roschektaev, Gonerger, 2012]. Они располагаются преимущественно по системе субмеридиональных разломов, вызванных рифтогенезом [Gordienko et al., 2016]. Именно к этому возрастному уровню относятся дайки первого выделенного нами дайкового комплекса с возрастом 798 млн лет, относящегося к барун-холбинскому вулканоплутоническому комплексу. На данном этапе происходит концентрация золота в основном вдоль меридиональных разрывных нарушений первого порядка и вдоль зон внедрения даек.

В ходе дальнейших геодинамических перестроек (805–770 млн лет) происходит закрытие краевых спрединговых бассейнов и заложение зон субдукции. На активной континентальной окраине, включающей и Гарганский блок, закладывается Сархойская островодужная система и Окинский задуговой бассейн [Kuzmichev, Larionov, 2013; Gordienko et al., 2021]. Активное

плавление нижней коры приводило к образованию надсубдукционных периферических очагов тоналит-плагиогранитного состава и тел сумсунурского интрузивного комплекса (785 ± 11 млн лет, U-Pb-метод) [Kuzmichev, 2004].

На аккреционно-коллизийном этапе (640–500 млн лет) происходит перестройка активной континентальной окраины ПАО, в том числе в результате наиболее активных аккреционных событий в Окинской СМЗ. В результате в ослабленной гравитационной нестабильностью зоне происходит активизация тектономагматических процессов, вызванная возобновленной деятельностью мантийного плюма [Dobretsov, 2020; Gordienko et al., 2021]. С этим сопряжено активное внедрение коллизийных позднеордовикских и внутриплитных девонских гранитоидов и щелочных пород, возникновение многочисленных зон гранитизации и ремобилизации сиалического фундамента Гарганского блока и внедрение гранитов с 460–480 млн лет [Khain et al., 1995; Korol'kov, 2007; Kuzmichev, 2004; Gordienko et al., 2016]. Происходит внедрение малых интрузий и дайковых тел, относимых к холбинскому комплексу. К последним можно отнести дайки второго дайкового комплекса андезит-дацитового состава, проявленные преимущественно в южной части месторождения. С этим этапом связано формирование главных промышленных золоторудных месторождений региона [Damdinov, 2018]. Этот этап заканчивается в верхнем палеозое, когда вся территория Восточного Саяна была охвачена массовыми сдвиговыми деформациями и процессами внутриплитного (плюмового) магматизма [Buslov, 2011; Kuzmin, Yarmolyuk, 2014; Gordienko et al., 2016]. Эти процессы приводят к переотложению (инициируют переотложение) золота в зонах, подверженных деформационным и разрывным нарушениям. По формирующимся рудовещающим тектоническим зонам дробления и меланжа развиваются метасоматизированные минерализованные зоны с золото-кварц-полисульфидной минерализацией (394 ± 7 млн лет) на месторождении Владимирском, которые мы видим сегодня. Наибольшее их развитие наблюдается вдоль разрывных нарушений второго порядка, особенно в местах их пересечения с меридиональными разломами и дайками. В зонах высокой проницаемости при метаморфизме в условиях водонасыщенной системы формируются минерализованные зоны мощностью от 20–50 м, уходящие в глубину до 3 км. Связь золоторудных месторождений Гарганской СМЗ со сдвиговыми структурами отмечалась ранее [Zhmodik et al., 2006]. Это подтверждается и последними исследованиями для других крупных месторождений золота региона. На основе изотопного $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования слюд из рудных жил и околорудных метасоматитов установлено, что возраст слюд из минерализованных зон Зун-Холбинского месторождения находится в интервале 353.9–386.4 млн лет, а возраст слюд из околожилных милонитизированных лиственитов Зун-Оспинского золоторудного месторождения – 352.9 млн лет [Damdinov

et al., 2018]. Позднепалеозойские изотопные данные свидетельствуют о том, что формирование и локализация золотосульфидных месторождений Урик-Китойской зоны связаны со сдвиговыми деформациями, проявленными в это время в пределах всего Центрально-Азиатского складчатого пояса и обусловленными коллизией Казахстано-Байкальского и Сибирского континентов [Buslov, 2011].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование месторождения Владимирского является многоэтапным процессом, проходившим в палеозое в соответствии с геологической историей развития юго-восточной части Восточного Саяна и связанным с островодужным и плюмовым магматизмом. Золоторудная минерализация месторождения имеет полихронное происхождение. Формирование жильно-дайковых рудно-магматических систем месторождения тесно связано с раннепалеозойскими субдукционными, аккреционно-коллизийными процессами, вызвавшими внедрение даек и мощную проработку как вулканогенно-осадочных и офиолитовых пород, так и пород архейского основания Гарганского блока, что привело к формированию основной массы золотого оруденения. Мощные сдвиговые деформации, имевшие место в позднепалеозойский период, привели к повторной ремобилизации и переотложению золота в минерализованных зонах с кварц-полисульфидными жилами. Основными рудоконтролирующими структурами месторождения выступают кулисообразные разрывные нарушения второго порядка северо-западного простирания. Подобная картина образования золоторудного месторождения согласуется с существующей в настоящее время моделью формирования золотосульфидно-кварцевых месторождений юго-восточной части Восточного Саяна, в истории образования которых также выделяются раннепалеозойский аккреционно-коллизийный и позднепалеозойский сдвиговый возрастные этапы.

6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

7. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Anisimova I.V., Levitsky I.V., Sal'nikova E.B., Kotov A.B., Levitsky V.I., Reznitsky L.Z., Efimov S.V., Velikoslavinsky S.D.,

- Barash I.G., Fedoseenko A.M., 2009. The Age of the Foundation of the Gargana Block (East Sayan): Results of U-Pb Geochronological Studies. In: Isotope Systems and Timing of Geological Processes. Proceedings of the IV Russian Conference on Isotope Geochronology (June 02–04, 2009). Vol. 1. Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, Saint Petersburg, p. 34–35 (in Russian) [Анисимова И.В., Левицкий И.В., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Левицкий В.И., Резницкий Л.З., Ефимов С.В., Великославинский С.Д., Бараш И.Г., Федосеенко А.М. Возраст фундамента Гарганской глыбы (Восточный Саян): результаты U-Pb геохронологических исследований // Изотопные системы и время геологических процессов: Материалы IV Российской конференции по изотопной геохронологии (2–4 июня 2009 г.). СПб.: ИГГД РАН, 2009. Т. 1. С. 34–35].
- Avdontsev N.A., 1967. Granitoids of the Gargan Block. Nauka, Leningrad, 99 p. (in Russian) [Авдонцев Н.А. Гранитоиды Гарганской глыбы. Л.: Наука, 1967. 99 с.].
- Baksi A.K., Archibald D.A., Farrar E., 1996. Intercalibration of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating Standards. *Chemical Geology* 129 (3–4), 307–324. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00154-9](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00154-9).
- Buslov M.M., 2011. Tectonics and Geodynamics of the Central Asian Foldbelt: The Role of Late Paleozoic Large-Amplitude Strike-Slip Faults. *Russian Geology and Geophysics* 52 (1), 52–71. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.12.005>.
- Buslov M.M., Saphonova I.Y., Watanabe T., Obut O.T., Fujiwara Y., Iwata K., Semakov N.N., Sugai Y., Smirnova L.V., Kazansky A.Y., 2001. Evolution of the Paleo-Asian Ocean (Altai-Sayan Region, Central Asia) and Collision of Possible Gondwana-Derived Terranes with the Southern Marginal Part of the Siberian Continent. *Geosciences Journal* 5, 203–224. <http://doi.org/10.1007/BF02910304>.
- Buzov S.A., 2009. Structural Control of Gold Mineralization at the Vladimirsky Site (Eastern Sayan). Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences: Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits 34 (1), 37–44 (in Russian) [Бузов С.А. Структурный контроль золотого оруденения на участке Владимирский (Восточные Саяны) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2009. Т. 34. № 1. С. 37–44].
- Damdinov B.B., 2018. Types of Noble Metal Mineralization in the Southeastern Part of the Eastern Sayan. Composition, Conditions of Formation and Genesis. PhD Thesis (Doctor of Geology and Mineralogy). Ulan-Ude, 480 p. (in Russian) [Дамдинов Б.Б. Типы благороднометалльного оруденения юго-восточной части Восточного Саяна: состав, условия формирования и генезис: Дис. ... докт. геол.-мин. наук. Улан-Удэ, 2018. 480 с.].
- Damdinov B.B., 2019. Mineral Types of Gold Deposits and Regularities of Their Localization in Southeastern East Sayan. *Geology of Ore Deposits* 61, 118–132. <http://dx.doi.org/10.1134/S1075701519020016>.
- Damdinov B.B., Zhmodik S.M., Khubanov V.B., Mironov A.G., Travin A.V., Damdinova L.B., 2020. Age and Geodynamic Conditions of Formation for the Neoproterozoic Gold-Bearing Granitoids in the Eastern Sayan. *Geotectonics* 54, 356–365. <https://doi.org/10.1134/S001685212002003X>.
- Damdinov B.B., Zhmodik S.M., Travin A.V., Yudin D.S., Goryachev N.A., 2018. New Data on the Age of Gold Mineralization in the Southeastern Part of Eastern Sayan. *Doklady Earth Sciences* 479, 429–432. <http://doi.org/10.1134/S1028334X18040116>.
- Dobretsov N.L., 2020. Plate Tectonics vs. Plume Tectonics Interplay: Possible Models and Typical Cases. *Russian Geology and Geophysics* 61 (5–6), 502–526. <http://doi.org/10.15372/RGG2020102>.
- Dobretsov N.L., Buslov M.M., Safonova I.Yu., Kokh D.A., 2004. Fragments of Oceanic Islands in the Kurai and Katun' Accretionary Wedges of Gornyy Altai. *Russian Geology and Geophysics* 45 (12), 1381–1403.
- Dobretsov N.L., Ignatovich V.I. (Eds), 1988. Geology and Metamorphism of the East Sayan. Nauka, Novosibirsk, 192 p. (in Russian) [Геология и метаморфизм Восточного Саяна / Ред. Н.Л. Добрецов, В.И. Игнатович. Новосибирск: Наука, 1988. 192 с.].
- Dobretsov N.L., Ignatovich V.I. (Eds), 1989. Geology and Ore Content of East Sayan Region. Nauka, Novosibirsk, 127 p. (in Russian) [Геология и рудоносность Восточного Саяна / Ред. Н.Л. Добрецов, В.И. Игнатович. Новосибирск: Наука, 1989. 127 с.].
- Dobretsov N.L., Konnikov E.G., Dobretsov N.N., 1992. Precambrian Ophiolitic Belts of Southern Siberia (Russia) and Their Metallogeny. *Precambrian Research* 58, (1–4), 427–446. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(92\)90128-B](https://doi.org/10.1016/0301-9268(92)90128-B).
- Fedotova A.A., Hain E.V., 2002. Tectonics of the South of the Eastern Sayan and Its Position in the Ural-Mongolian Belt. *Nauchny Mir, Moscow*, 176 p. (in Russian) [Федотова А.А., Хаин Е.В. Тектоника юга Восточного Саяна и его положение в Урало-Монгольском поясе. М.: Научный мир, 2002. 176 с.].
- Feofilaktov G.A., 1968. Some Features of Geology, Structural Conditions of Localization and the Genesis of Gold Deposits in One of the Regions of the Eastern Sayan. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute* 134, 80–89 (in Russian) [Феофилактов Г.А. Некоторые черты геологии, структурные условия локализации и генезис золоторудных месторождений одного из районов Восточного Саяна // Известия Томского политехнического института. 1968. Т. 134. С. 80–89].
- Feofilaktov G.A., 1970. On the Genetic Relationship of Gold Mineralization with Granitoid Massifs of the Kitoi-Urik Ore Cluster (Eastern Sayan). In: *Ore Potential and Structures of Ore Deposits of the Buryat ASSR*. Ulan-Ude, p. 90–99 (in Russian) [Феофилактов Г.А. О генетической связи золотого оруденения с гранитоидными массивами Китоиско-Урикского рудного узла (Восточный Саян) // Рудоносность и структуры рудных месторождений Бурятской АССР. Улан-Удэ, 1970. С. 90–99].

Globa V.A., 1963. The Main Features of the Geology and Gold Content of One of the Regions of the Eastern Sayan. In: Materials on the Geology of Ore Deposits of the Baikal Region. East Siberian Geological Institute of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, Irkutsk, p. 101–129 (in Russian) [Глоба В.А. Основные черты геологии и золотоносности одного из районов Восточного Саяна // Материалы по геологии рудных месторождений Прибайкалья. Иркутск: Вост.-Сиб. геол. институт СО АН СССР, 1963. С. 101–129].

Goneger A.V., Roschektaev P.A., 2012. The Role of Upper Paleozoic Volcanism in the Formation of Gold Mineralization of the Khuzhir Ore Field (Eastern Sayan). In: Geology of Transbaikalia. Proceedings of the II All-Russian Youth Scientific Conference Dedicated to the 85-th Anniversary of the Birth of Corresponding Member F.P. Krendeliev. Publishing House of BSC SB RAS, Ulan-Ude, p. 173–176 (in Russian) [Гонегер А.В., Рошчектаев П.А. Роль верхнепалеозойского вулканизма в формировании золотого оруденения Хужирского рудного поля (Восточный Саян) // Геология Забайкалья: Материалы II Всероссийской молодежной научной конференции, посвященной 85-летию со дня рождения чл.-кор. РАН Ф.П. Кренделева. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2012. С. 173–176].

Gordienko I.V., Dobretsov N.L., Zhmodik S.M., Roshchektaev P.A., 2021. Multistage Thrust and Nappe Tectonics in the Southeastern Part of East Sayan and Its Role in the Formation of Large Gold Deposits. Russian Geology and Geophysics 62 (1), 109–120. <https://doi.org/10.2113/RGG20204283>.

Gordienko I.V., Roshchektaev P.A., Gorokhovskiy D.V., 2016. Oka Ore District of the Eastern Sayan: Geology, Structural-Metallogenic Zonation, Genetic Types of Ore Deposits, Their Geodynamic Formation Conditions, and Outlook for Development. Geology of Ore Deposits 58, 361–382. <http://doi.org/10.1134/S1075701516050044>.

Ilyasova A.M., Rasskazov S.V., Skopintsev V.G., Fefelov N.N., Yasnygina T.A., 2010. Basite Dykes of Different Ages in the Southeastern Part of the Eastern Sayan: Geochemical and Isotope Characteristics of Deep Sources. In: Magmatism and Metamorphism in the History of the Earth. Abstracts of the XI All-Russia Petrographic Meeting (August 24–28, 2010). Vol. 1. IGG UB RAS, Ekaterinburg, p. 283–284 (in Russian) [Ильясова А.М., Рассказов С.В., Скопинцев В.Г., Фефелов Н.Н., Ясныгина Т.А. Разновозрастные базитовые дайки юго-восточной части Восточного Саяна: геохимические и изотопные характеристики глубинных источников // Магматизм и метаморфизм в истории Земли: Тезисы докладов XI Всероссийского петрографического совещания (24–28 августа 2010 г.). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2010. Т. 1. С. 283–284].

Jensen L.S., 1976. A New Cation Plot for Classifying Subalkalic Volcanic Rocks. Ontario Geological Survey Miscellaneous Paper 66. 22 p.

Khain E.V., Bibikova E.V., Kröner A., Zhuravlev D.Z., Sklyarov E.V., Fedotova A.A., Kravchenko-Berezhnoy I.R., 2002. The Most Ancient Ophiolite of the Central Asian Fold Belt: U-Pb and Pb-Pb Zircon Ages for the Dunzhugur Complex,

Eastern Sayan, Siberia, and Geodynamic Implications. Earth Planet. Earth and Planetary Sciences Letters 199 (3–4), 311–325. [http://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00587-3](http://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00587-3).

Khain E.V., Neimark L.A., Amelin Yu.V., 1995. Caledonian Stage of Remobilization of the Precambrian Basement of the Gargan Block, East Sayan (Isotope Geochronological Data). Doklady Earth Sciences 342 (6), 776–780 (in Russian) [Хаин Е.В., Неймарк Л.А., Амелин Ю.В. Каледонский этап ремобилизации докембрийского фундамента Гарганской глыбы, Восточный Саян (изотопно-геохронологические данные) // Доклады АН. 1995. Т. 342. № 6. С. 776–780].

Kiseleva O.N., Airiyants E.V., Belyanin D.K., Zhmodik S.M., Ashchepkov I.V., Kovalev S.A., 2020. Multistage Magmatism in Ophiolites and Associated of the Ulan-Sar'Dag Mélange (East Sayan, Russia). Minerals 10 (1077), 2–29. <http://doi.org/10.3390/min10121077>.

Kiseleva O.N., Zhmodik S.M., 2017. PGE Mineralization and Melt Composition of Chromitites in Proterozoic Ophiolite Complexes of Eastern Sayan, Southern Siberia. Geoscience Frontiers 8 (4), 721–731. <http://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.04.003>.

Konnikov E.G., Mironov A.G., Tsygankov A.A., Posokhov V.F., Vrublevskaaya T.T., Kulikov A.A., Kulikova A.B., 1995. Genesis of Plutonogenic Gold Mineralization in the Late Precambrian, Sayan-Baikal Folded Area. Russian Geology and Geophysics 36 (4), 37–52 (in Russian) [Конников Э.Г., Миронов А.Г., Цыганков А.А., Посохов В.Ф., Врублевская Т.Т., Куликов А.А., Куликова А.Б. Генезис плутоногенного золотого оруденения в позднем докембрии Саяно-Байкальской складчатой области // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 4. С. 37–52].

Korol'kov A.T., 2007. Geodynamics of Gold Ore Regions of the Southern East Siberia. ISU Publishing House, Irkutsk, 251 p. (in Russian) [Корольков А.Т. Геодинамика золоторудных районов юга Восточной Сибири. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2007. 251 с.].

Kovach V.P., Matukov D.I., Berezhnaya N.G., Kotov A.B., Levitsky V.I., Barash I.G., Kozakov I.K., Levsky L.K., Sergeev S.A., 2004. SHRIMP Zircon Age of the Gargan Block Tonality – Find Early Precambrian Basement of the Tuvino-Mongolian Microcontinent, Central Asia Mobile Belt. In: Tectonics of Precambrian Mobile Belts. Abstracts of the 32nd International Geological Congress (August 20–28, 2004, Florence, Italy). Abstracts CD, p. 1263.

Kucherenko I.V., 2015. Petrology of Hydrothermal Metasomatism of Dolerites of Intraore Dikes of Mesothermal Gold Deposits. Part 2. Zun-Kholba Deposit (Eastern Sayan). Bulletin of the Tomsk Polytechnic University 326 (1), 73–86 (in Russian) [Кучеренко И.В. Петрология гидротермального метасоматизма долеритов внутрирудных даек мезотермальных месторождений золота. Часть 2. Месторождение Зун-Холба (Восточный Саян) // Известия Томского политехнического университета. 2015. Т. 326. № 1. С. 73–86].

Kuzmichev A.B., 2004. Tectonic History of the Tuva-Mongolian Massif: Early Baikal, Late Baikal and Early Caledonian Stages. Probel-2000, Moscow, 192 p. (in Russian)

[Кузьмичев А.Б. Тектоническая история Тувино-Монгольского массива: раннебайкальский, позднебайкальский и раннекаледонский этапы. М.: Пробел-2000, 2004. 192 с.].

Kuzmichev A.B., 2015. Neoproterozoic Accretion of the Tuva-Mongolian Massif, One of the Precambrian Terranes in the Central Asian Orogenic Belt. In: A. Kroner (Ed.), Composition and Evolution of Central Asian Orogenic Belt: Geology, Evolution, Tectonics, and Models. Borntraeger Science Publishers, Stuttgart, p. 66–92.

Kuzmichev A.B., Bibikova E.V., Zhuravlev D.Z., 2001. Neoproterozoic (~800 Ma) Orogeny in the Tuva-Mongolia Massif (Siberia): Island Arc-Continent Collision at the Northeast Rodinia Margin. *Precambrian Research* 110 (1–4), 109–126. [http://doi.org/10.1016/S0301-9268\(01\)00183-8](http://doi.org/10.1016/S0301-9268(01)00183-8).

Kuzmichev A.B., Larionov A.N., 2011. The Sarkhoi Group in East Sayan: Neoproterozoic (~770–800 Ma) Volcanic Belt of the Andean Type. *Russian Geology and Geophysics* 52 (7), 685–700. <http://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.06.001>.

Kuzmichev A.B., Larionov A.N., 2013. Neoproterozoic Island Arcs in East Sayan: Duration of Magmatism (from U-Pb Zircon Dating of Volcanic Clastics). *Russian Geology and Geophysics* 54 (1), 34–43. <http://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.12.003>.

Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., 2014. Mantle Plumes of Central Asia (Northeast Asia) and Their Role in Forming Endogenous Deposits. *Russian Geology and Geophysics* 55 (2), 120–143. <http://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.01.002>.

Kuznetsov A.B., Letnikova E.F., Vishnevskaya I.A., Konstantinova G.V., Kutyavin E.P., Geletii N.K., 2010. Sr Chemostratigraphy of Carbonate Sedimentary Cover of the Tuva-Mongolian Microcontinent. *Doklady Earth Sciences* 432, 577–582. <http://doi.org/10.1134/S1028334X10050065>.

Kuznetsov A.B., Vasilieva M.I., Sitkina D.R., Smirnova Z.B., Kaurova O.K., 2018. Age of Carbonates and Phosphorites in the Sedimentary Cover of the Tuva-Mongolian Microcontinent. *Doklady Earth Sciences* 479, 282–285. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18030030>.

Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B., 1986. A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology* 27 (3), 745–750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>.

Letnikova E.F., Geletii N.K., Sklyarov E.V., 2001. Lithological and Geochemical Features of Carbonate Rocks in the Sedimentary Cover of the Gargan Terrain, Southeastern East Sayan. *Gondwana Research* 4 (4), 680. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70475-5](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70475-5).

Ludwig K.R., 2012. ISOPLOT 3.75. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. User's Manual. Berkeley Geochronology Center Special Publication 5, 75 p.

Mironov A.G., Zhmodik S.M., 1999. Gold Deposits of the Urik-Kitoy Metallogenic Zone (Eastern Sayan, Russia). *Geology of Ore Deposits* 41 (1), 46–60.

Neumark L.A., Rytsk E.Yu., Ovchinnikova G.V., Sergeeva N.A., Gorokhovskiy V.M., Skopintsev V.G., 1995. Lead Isotopes in Gold Deposits of the Eastern Sayan (Russia). *Geology of Ore Deposits* 37 (3), 201–212.

Rasskazov S.V., 1993. Magmatism of the Baikal Rift System. Nauka, Novosibirsk, 288 p. (in Russian) [Рассказов С.В. Магматизм Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: Наука, 1993. 288 с.].

Roschektaev P.A., Goner A.V., 2012. Neoproterozoic Volcanism of the Southeastern Part of the Eastern Sayan and the Connection of Gold Mineralization with It. In: Mineralogy of Northeast Asia. Proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference Dedicated to the 20th Anniversary of the Department of Geology of the Buryat State University. Publishing House Ecos, Ulan-Ude, p. 136–140 (in Russian) [Рощектаев П.А., Гонегер А.В. Неопротерозойский вулканизм юго-восточной части Восточного Саяна и связь с ним золотого оруденения // Минералогия Северо-Восточной Азии: Материалы III Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 20-летию кафедры геологии Бурятского государственного университета. Улан-Удэ: Издательский дом «Экос», 2012. С. 136–140].

Roschektaev P.A., Mironov A.G., Doroshkevich G.I., Bakhitina O.T., Minin V.V., Maurishnin E.S., Ananin V.A., Zhmodik S.M. et al., 2004. Gold of Buryatia. Book 1. Publishing House of BSC SB RAS, Ulan-Ude, 515 p. (in Russian) [Рощектаев П.А., Миронов А.Г., Дорошкевич Г.И., Бахитина О.Т., Минин В.В., Мауришнин Е.С., Ананин В.А., Жмодик С.М. Золото Бурятии. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2004. Кн. 1. 515 с.].

Salop L.I., 1960. History of the Geological Development of the Precambrian Geosynclinal System of the Baikalic. In: Precambrian Stratigraphy and Correlation. Reports of Soviet Geologists, IGC 21st Session, Problem 9. Publishing House of the USSR Academy of Science, Moscow-Leningrad, p. 91–104 (in Russian) [Салоп Л.И. История геологического развития докембрийской геосинклинальной системы байкалик // Стратиграфия и корреляция докембрия. Доклады советских геологов. 21-я сессия МГК. Проблема 9. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 91–104].

Semeikin I.N., Dolnik T.A., Titorenko T.N., 2006. Cyclic Stratigraphy and Ore Content of the Riphean-Paleozoic Deposits of the Okino-Kitoy Region (Eastern Sayan). Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences: Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits 29 (3), 84–104 (in Russian) [Семейкин И.Н., Дольник Т.А., Титоренко Т.Н. Циклическая стратиграфия и рудоносность рифей-палеозойских отложений Окино-Китойского района (Восточный Саян) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2006. Т. 29. № 3. С. 84–104].

Seminsky Zh.V., Buzov S.A., 2007. Tectonic Conditions of Localizing the Gold Mineralization in Ancient Blocks of the Earth's Crust (Using Okino-Kitoy Metallogenic Belt of the East Sayan Mountains as an Example). Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration 5, 41–46 (in Russian) [Семинский Ж.В., Бузов С.А. Тектонические условия локализации золотого оруденения в активизированных древних блоках земной

коры (на примере Окино-Китойского металлогенического пояса Восточных Саян) // Известия вузов. Геология и разведка. 2007. № 5. С. 41–46].

Seminsky Zh.V., Korolkov A.T., Buzov S.A., 2014. Ore-Controlling Structures of Gold Ore Clusters in Gneiss and Granite-Gneiss Complexes (Eastern Siberia). Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences: Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits 45 (2), 19–34 (in Russian) [Семинский Ж.В., Корольков А.Т., Бузов С.А. Рудоконтролирующие структуры золоторудных узлов в гнейсовых и гранитогнейсовых комплексах (Восточная Сибирь) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2014. Т. 45. № 2. С. 19–34].

Sengör A.M.C., Natal'in B.A., 1996. Palaeotectonics of Asia: Fragments of a synthesis. In: A. Yin, T.M. Harrison (Eds), The Tectonic Evolution of Asia. Cambridge University Press, Cambridge, p. 486–640.

Sklyarov E.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Menshagin Yu.V., Watanabe T., Pisarevsky S.A., 2003. Neoproterozoic Mafic Dike Swarms of the Sharyzhalgai Metamorphic Massif (Southern Siberian Craton). Precambrian Research 122 (1–4), 359–376. [http://doi.org/10.1016/S0301-9268\(02\)00219-X](http://doi.org/10.1016/S0301-9268(02)00219-X).

Sklyarov E.V., Kovach V.P., Kotov A.B., Kuzmichev A.B., Lavrenchuk A.V., Perelyaev V.I., Shchipansky A.A., 2016. Boninites and Ophiolites: Problems of Their Relations and Petrogenesis of Boninites. Russian Geology and Geophysics 57 (1), 127–140. <http://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.009>.

Skopintsev V.G., Skopintseva E.V., Ivlev A.S. et al., 2013. Geological Report – GDP-200 of Sheets N-47-XXXV, XXXVI (Sayan Area). Ulan-Ude (in Russian) [Скопинцев В.Г., Скопинцева Е.В., Ивлев А.С. и др. Геологический отчет – ГДП-200 листов N-47-XXXV, XXXVI (Саянская площадь). Улан-Удэ, 2013].

Travin A.V., Yudin D.S., Vladimirov A.G., Khromykh S.V., Volkova N.I., Mekhonoshin A.S., Kolotilina T.B., 2009. Thermochronology of the Chernorud Granulite Zone, Ol'khon

Region, Western Baikal Area. Geochemistry International 47, 1107–1124. <https://doi.org/10.1134/s0016702909110068>.

Tsigankov A.A., Posokhov V.F., Mironov A.G., 2003. To the Problem of Granitoids of the Sumsunur Complex (Eastern Sayan). Vestnik of Tomsk State University. Appendix 3 (I): Problems of Geology and Geography of Siberia. Proceedings of the Scientific Conference Dedicated to the 125th Anniversary of the Founding of Tomsk State University and the 70th Anniversary of the Foundation of the Faculty of Geology and Geography (April 2–4, 2003). Tomsk, p. 183–186 (in Russian) [Цыганков А.А., Посохов В.Ф., Миронов А.Г. К проблеме возраста гранитоидов сумсунурского комплекса (Восточный Саян) // Вестник Томского государственного университета. Приложение 3 (I): Проблемы геологии и географии Сибири: Материалы научной конференции, посвященной 125-летию основания Томского государственного университета и 70-летию образования геолого-географического факультета (2–4 апреля 2003 г.). Томск, 2003. С. 183–186].

Zhmodik S.M., Buslov M.M., Damdinov B.B., Mironov A.G., Khubanov V.B., Buyantuyev M.G., Damdinova L.B., Airiyants E.V., Kiseleva O.N., Belyanin D.K., 2022. Mineralogy, Geochemistry, and Geochronology of the Yehe-Shigna Ophiolitic Massif, Tuva-Mongolian Microcontinent, Southern Siberia: Evidence for a Back-Arc Origin and Geodynamic Implications. Minerals 12 (4), 390. <https://doi.org/10.3390/min12040390>.

Zhmodik S.M., Postnikov A.A., Buslov M.M., Mironov A.G., 2006. Geodynamics of the Sayan-Baikal-Muya Accretion-Collision Belt in the Neoproterozoic – Early Paleozoic and Regularities of the Formation and Localization of Precious-Metal Mineralization. Russian Geology and Geophysics 47 (1), 183–197 (in Russian) [Жмодик С.М., Постников А.А., Буслов М.М., Миронов А.Г. Геодинамика Саяно-Байкало-Муйского аккреционно-коллизийного пояса в неопроterозое – раннем палеозое, закономерности формирования и локализации благороднометалльного оруденения // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 1. С. 183–197].

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

Таблица 1.1. Химический состав пород дайковых комплексов

Table 1.1. Chemical composition of rocks of dyke complexes

Ком-плекс	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	BaO	SO ₃	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	NiO	LOI	SUM
1	48.51	1.27	16.10	10.30	0.15	4.51	5.59	4.66	0.98	0.23	0.03	0.66	0.04	0.01	<0.01	2.81	95.85
	47.82	1.26	16.58	10.78	0.16	4.87	6.44	4.19	0.90	0.22	0.01	0.52	0.04	0.01	<0.01	1.65	95.44
	48.74	1.26	17.06	11.17	0.18	4.53	9.33	2.83	0.82	0.21	0.01	0.21	0.04	0.01	<0.01	1.38	97.76
	49.88	1.30	16.82	11.06	0.18	4.34	9.37	2.79	0.80	0.22	0.01	0.28	0.04	<0.01	<0.01	1.73	98.82
	49.43	1.28	16.53	10.73	0.16	4.69	8.86	2.62	0.62	0.23	0.01	0.56	0.04	0.01	0.05	1.22	97.04
	52.64	0.57	17.98	13.90	0.06	5.21	3.83	3.68	0.89	0.18	0.13	0.25	0.01	<0.01	0.01	2.43	101.77
	47.58	1.49	17.05	15.07	0.12	5.28	5.26	0.95	0.26	0.21	0.01	0.13	0.03	0.03	<0.01	3.06	96.53
	49.94	0.86	14.86	12.07	0.17	5.29	9.33	2.34	0.58	0.08	0.02	0.14	0.04	0.03	0.01	2.22	97.98
	49.78	0.98	15.92	11.85	0.11	6.91	6.88	2.75	0.86	0.05	0.08	<0.03	0.02	0.01	0.01	2.27	98.48
	49.29	0.98	14.49	12.35	0.18	5.81	4.31	4.95	0.91	0.09	0.01	0.11	0.04	0.01	<0.01	1.65	95.19
48.17	0.55	14.29	11.79	0.11	4.34	5.93	2.94	0.59	0.05	0.02	0.11	0.02	0.01	<0.01	2.58	91.51	
2	63.20	0.55	15.29	4.97	0.10	4.38	3.89	4.38	2.20	0.16	0.31	0.04	0.02	<0.01	0.01	1.13	100.63
	62.84	0.55	16.74	4.40	0.07	1.52	3.90	5.46	0.70	0.20	0.09	0.54	0.01	<0.01	0.01	2.23	99.26
	63.88	0.50	14.98	4.45	0.05	1.22	4.52	6.02	0.98	0.17	0.09	0.10	0.01	<0.01	0.01	2.33	99.21
	63.34	0.58	13.46	4.71	0.06	2.39	5.30	4.26	1.90	0.19	0.06	0.13	0.01	<0.01	0.01	2.80	99.19
	63.58	0.53	16.33	4.82	0.06	2.42	4.48	4.77	1.05	0.18	0.05	0.13	0.01	<0.01	0.01	1.48	99.88
	63.59	0.41	13.54	3.14	0.06	0.82	6.64	6.21	1.20	0.14	0.11	2.39	0.01	<0.01	<0.01	1.03	99.28

Таблица 1.2. Датировки пород дайковых комплексов юго-восточной части Восточного Саяна

Table 1.2. Dating of rocks of dyke complexes in the southeastern part of the Eastern Sayan

Магматический комплекс	Возраст (млн лет)	Метод	Литературный источник
Барун-Холбинский базитовый комплекс	829.9±7.2	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	[Roschektaev, Gonerger, 2012]
Холбинский комплекс (риолит-дацитовая дайковая серия)	508–452	Rb/Sr	[Skopintsev et al., 2013]
	470–412	K/Ar	[Avdontsev, 1967]
	478±19	U/Pb	[Khain et al., 1995]
Лампрофир-диабазовый дайковый комплекс	490–450	K/Ar	[Neumark et al., 1995]
Хундыгольский толеитовый комплекс	380	K/Ar	[Rasskazov, 1993]

Таблица 1.3. Результаты ⁴⁰Ar/³⁹Ar датированияTable 1.3. Results of ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating

T °C	t (мин)	⁴⁰ Ar (STP)	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	±1σ	³⁸ Ar/ ³⁹ Ar	±1σ	³⁶ Ar/ ³⁹ Ar	±1σ	Σ ³⁹ Ar (%)	Возраст (млн лет) ±1σ	±1σ
Мусковит ВС-17-19 (177.07 мг), J=0.006010±0.000094; возраст плато (980–1100 °C)=799±11 млн лет, включает 63.3 % выделенного ³⁹ Ar											
500	10	2.7	7.897	0.607	0.9887	0.0285	0.0254	0.0171	3.6	4.4	55.0
650	10	1.2	3.859	0.483	1.0197	0.0427	0.0120	0.0341	6.8	3.4	109.1
800	10	18.4	79.973	1.644	0.9590	0.0244	0.1517	0.0190	9.2	345.7	50.6
930	10	140.0	87.338	0.298	0.0622	0.0017	0.0100	0.0034	26.2	740.0	12.2
980	10	255.9	93.979	0.191	0.0283	0.0005	0.0027	0.0019	54.9	802.3	10.9
1030	10	195.7	93.530	0.248	0.0326	0.0011	0.0019	0.0027	77.1	800.7	11.7

Таблица 1.3 (продолжение)

Table 1.3 (continued)

T °C	t, мин	⁴⁰ Ar (STP)	⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	±1σ	³⁸ Ar/ ³⁹ Ar	±1σ	³⁶ Ar/ ³⁹ Ar	±1σ	Σ ³⁹ Ar (%)	Возраст (млн лет) ±1σ	±1σ
1100	10	108.2	92.228	0.234	0.0373	0.0010	0.0025	0.0051	89.5	790.4	14.7
1180	10	82.8	83.118	0.155	0.0706	0.0007	0.0066	0.0019	100.0	716.7	10.2
Биотит ВС-29-18 (106.54 мг), J=0.005773±0.000087; возраст промежуточного плато (600–800 °C)=428±7 млн лет, включает 12 % выделенного ³⁹ Ar											
500	10	13.4	132.933	71.720	1.8430	1.1361	0.0299	0.5388	0.4	974.6	1047.7
600	10	22.8	54.429	6.665	0.1120	0.1344	0.0100	0.1224	2.3	469.5	294.9
700	10	35.0	51.292	4.309	0.0778	0.0817	0.0055	0.0840	5.3	454.8	203.7
800	10	69.3	45.757	0.269	0.0868	0.0006	0.0054	0.0058	11.9	409.6	15.5
900	10	173.1	47.449	0.075	0.0342	0.0007	0.0023	0.0013	27.9	431.2	6.6
975	10	230.9	52.000	0.075	0.0281	0.0009	0.0000	0.0009	47.3	473.6	6.7
1040	10	557.9	62.766	0.076	0.0204	0.0005	0.0009	0.0011	86.2	555.7	7.7
1095	10	192.2	77.972	0.155	0.0370	0.0009	0.0073	0.0020	97.0	654.9	9.3
1150	10	65.3	95.409	0.670	0.0830	0.0027	0.0175	0.0070	100.0	756.6	17.5
Мусковит ВС-338а-18 (145.3 мг), J=0.005736±0.000086; возраст плато (800–1180 °C)=394±7 млн лет, включает 74.6 % выделенного ³⁹ Ar											
500	10	5.3	15.848	0.770	0.7166	0.0300	0.0505	0.0354	3.3	9.6	107.8
600	10	29.2	33.438	0.746	0.3295	0.0083	0.0284	0.0084	11.7	242.2	23.7
700	10	56.2	39.803	0.163	0.1842	0.0030	0.0158	0.0028	25.4	331.3	8.6
800	10	42.8	50.362	0.422	0.2232	0.0066	0.0161	0.0086	33.7	419.1	21.9
900	10	93.9	44.058	0.154	0.0676	0.0013	0.0036	0.0030	54.4	397.8	9.1
1000	10	167.8	41.593	0.073	0.0528	0.0023	0.0055	0.0017	93.5	372.3	6.6
1100	10	30.6	59.253	1.136	0.1153	0.0067	0.0265	0.0192	98.5	466.2	46.3
1180	10	14.8	95.784	3.839	0.3932	0.0195	0.1151	0.0403	100.0	547.2	92.5

Примечание. J – параметр, характеризующий величину нейтронного потока.

Note. J – parameter characterizing the magnitude of the neutron flux.