



THE HERCYNIAN IMPOSED DEFORMATIONS IN THE GOLETS VYSOCHAISHII DEPOSIT STRUCTURE (BAIKAL-PATOM BELT), $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ DATA

V.A. Vanin ¹✉, A.M. Mazukabzov ¹, D.S. Yudin ², A.V. Blinov ^{3,4}, Yu.I. Tarasova ^{3,4}

¹ Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

² Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

³ Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1a Favorsky St, Irkutsk 664033, Russia

⁴ Irkutsk National Research Technical University, 83 Lermontov St, Irkutsk 664074, Russia

ABSTRACT. The paper presents the results of the detailed structural analysis and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the deformations in the Golets Vysochaishii deposit area. The geological and structural studies showed the folded-deformation sequence from large lying folds through axial-plane cleavage formation and cleavage to quartz-filled fractures. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of syntectonic sericite yielded the ages of two Hercynian tectonic impulses – 340 and 320 Ma. This stage is characterized by the earlier-known successive complication of the Early Paleozoic fold-nappe structure of the area. Analysis has been made on four samples taken from different sites and characterized by different sets of deformational structures. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of 340 Ma reflects the formation of small-size folds as a result of interlayer sliding and sliding along the cleavage axial planes. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of 320 Ma reflects the formation of discretely manifested crenulation cleavage and low-Au, low-sulfidation quartz veins oriented obliquely to the elements of bedding and axial-plane cleavage.

KEYWORDS: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data; gold; Golets Vysochaishii deposit; fault; axial-plane cleavage; crenulation cleavage; folding; deformation

FUNDING: The work has been done under financial support of RFBR and the Irkutsk Region Administration as part of research project 20-45-380025.

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Vadim A. Vanin, vanin_geo@mail.ru

Received: August 18, 2021

Revised: December 1, 2021

Accepted: December 13, 2021

FOR CITATION: Vanin V.A., Mazukabzov A.M., Yudin D.S., Blinov A.V., Tarasova Yu.I., 2022. The Hercynian imposed deformations in the Golets Vysochaishii deposit structure (Baikal-Patom belt), $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (1), 0575. doi:10.5800/GT-2022-13-1-0575

НАЛОЖЕННЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ГЕРЦИНСКОГО ВРЕМЕНИ В СТРУКТУРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ГОЛЕЦ ВЫСОЧАЙШИЙ (БАЙКАЛО-ПАТОМСКИЙ ПОЯС), $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ДАННЫЕ

В.А. Ванин¹, А.М. Мазукабзов¹, Д.С. Юдин², А.В. Блинов^{3,4}, Ю.И. Тарасова^{3,4}

¹ Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

² Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

³ Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

⁴ Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе приведены результаты детального структурного анализа и изотопно-геохронологического $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования деформаций, проявленных на территории месторождения Голец Высочайший. В ходе выполнения геолого-структурных работ установлена последовательность проявления складчатых деформаций от крупных лежащих складок через формирование кливажа осевой поверхности и кренуляционного кливажа до разрывных нарушений, заполненных кварцевым материалом. С помощью $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования синтетонического серицита удалось установить возраст двух тектонических импульсов герцинского этапа – 340 и 320 млн лет. Этот этап характеризуется последовательным осложнением покровно-складчатой структуры района, сформированной на раннепалеозойском этапе, известном по литературным данным предшественников. Проанализированы четыре пробы, отобранные в различных местах и характеризующиеся различным набором деформационных структур. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраст 340 млн лет отражает формирование мелкой складчатости в результате межслоевых скольжений и скольжений по плоскостям кливажа осевой поверхности. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраст 320 млн лет отражает формирование дискретно проявленного кренуляционного кливажа и слабозолотоносных, малосульфидных кварцевых жил, занимающих секущее положение по отношению к элементам слоистости и кливажа осевой поверхности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ данные; золото; месторождение Голец Высочайший; разрывное нарушение; кливаж осевой поверхности; кренуляционный кливаж; складчатость; деформация

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-45-380025.

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа посвящена результатам комплексного изучения деформаций с помощью детального структурного анализа и изотопно-геохронологического $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования пород на территории месторождения Голец Высочайший. Месторождение локализовано в черносланцевых метаосадочных комплексах в 20 км к северо-востоку от месторождения-гиганта Сухой Лог. Голец Высочайший принадлежит группе орогенных месторождений и по запасам золота сопоставим с такими крупными месторождениями, как Светловское рудное поле, Невское, Красное, расположенными на территории Ленской золотоносной провинции.

Для месторождения Голец Высочайший, как и для прочих золоторудных объектов, расположенных в пределах Ленской золотоносной провинции, являются актуальными вопросы возраста рудоконтролирующих структур и собственно самого оруденения. Ранее работы по определению возраста формирования золотого оруденения на территории Байкало-Патомского пояса были проведены на месторождении Сухой Лог [Laverov et al., 2007]. Получен возраст 447 ± 6 млн лет (Rb-Sr данные) по валовым пробам для прожилково-вкрапленных

руд и 321 ± 14 млн лет (K-Ar данные) – для малосульфидных золотокварцевых жил. Возраст 450–440 млн лет (U-Pb данные) по циркону и монациту из рудной зоны месторождения Сухой Лог зафиксирован в работе [Yudovskaya et al., 2011]. В работе А.С. Якубчука была предпринята попытка получения геохронологических данных при Re-Os изотопном изучении синдеформационных метаморфических пиритов месторождения Сухой Лог (рудное тело фланга Западный). В данной работе был получен схожий возрастной интервал (510–476 млн лет) относительно ранее опубликованных датировок формирования золоторудной минерализации на месторождениях Бодайбинского района. Тем не менее, принимая во внимание сложность датирования, связанную с высоким содержанием Os, низким отношением $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$, а также значительную погрешность определения возраста (508 ± 33 и 477 ± 20 млн лет) [Yakubchuk et al., 2014], относиться к предложенным датировкам следует как к предварительным результатам, требующим дальнейшего изучения. В работе [Tarasova et al., 2021] для месторождения Голец Высочайший получен возраст плато 437 ± 62 млн лет по пириту-III из прожилково-вкрапленной золоторудной зоны и 331 ± 9 млн лет по пириту-IV, который, согласно

авторам, генетически связан с наложенными деформациями ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ данные по серициту в пирите). Однако сложность анализа, связанная с крайне низкими содержаниями аргона в пирите, а соответственно, со значительной погрешностью полученных датировок, заставляет с некоторым сомнением относиться к точности полученных датировок.

Тем не менее перечисленные данные свидетельствуют о том, что на территории Бодайбинского района, в пределах которой расположено месторождение Голец Высочайший, фиксируется как минимум два тектонических этапа с временными интервалами 450–440 и 330–320 млн лет. Полученный вывод хорошо вписывается в двухэтапную метаморфогенно-метасоматическую модель формирования месторождений Бодайбинского района, активно обсуждаемую в последнее время [Large et al., 2007; Meffre et al., 2008; Nemerov et al., 2010; Tauson et al., 2015; Bryukhanova et al., 2014, 2020; Palenova et al., 2015; Tarasova et al., 2016, 2020].

В работе приводятся результаты определения возраста $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом анализа синтетектонических слюд в складчатых сооружениях месторождения Голец Высочайший. Полученные данные позволили дополнить последовательность тектонических событий, произошедших в пределах южного обрамления Сибирской платформы, в той или иной мере повлиявших на становление рудной минерализации региона.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ геохронологические исследования проводились в Аналитическом центре ИГМ СО РАН методом ступенчатого прогрева по методике, описанной в работе [Travin et al., 2009]. Минералы для $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ изотопно-геохронологических исследований выделялись с использованием стандартных методик магнитной и плотностной сепарации. Навески минеральных фракций совместно с навесками биотита МСА-11 (ОСО № 129-88), используемого в качестве монитора, заворачивались в алюминиевую фольгу, помещались в кварцевую ампулу и после откачки из нее воздуха запаивались. Биотит МСА-11, подготовленный ВИМС в 1988 году как стандартный К/Аг образец, был аттестован в качестве $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ монитора с помощью международных стандартных образцов мусковита Bern 4m, биотита LP-6 [Baksi et al., 1996]. В качестве интегрального возраста биотита МСА-11 принято среднее значение результатов калибровки, составившее 311.0 ± 1.5 млн лет. Особенностью методики является облучение кварцевых ампул с пробами в охлаждаемом водой канале исследовательского реактора в Физико-техническом институте Томского политехнического университета (г. Томск). При облучении в таких условиях температура ампул с образцами не превышает 100 °С. Градиент нейтронного потока не превышал 0.5 % от размера образца. Эксперименты по ступенчатому прогреву проводились в кварцевом реакторе с печью внешнего прогрева. Холостой опыт по ^{40}Ar (10 мин при 1200 °С) не превышал 5×10^{-10} нсм³. Очистка аргона производилась

с помощью Ti- и ZrAl SAES-геттеров. Изотопный состав аргона измерялся на масс-спектрометре Noble gas 5400 фирмы Микромасс (Англия) и на многоколлекторном масс-спектрометре Argus фирмы GV-Instruments (Англия). Ошибки измерений, приведенные в тексте и на рисунках, соответствуют интервалу $\pm 1\sigma$.

Геохронологические исследования проводились в комплексе с геолого-структурными исследованиями. Пробоподготовка осуществлялась в ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН. Большое внимание уделялось таким плоскостным структурным элементам, как слоистость, кливаж осевой поверхности (ОП), кренуляционный кливаж (кливаж плейчатости), а также разрывные нарушения, заполненные кварцевым материалом. К упомянутым структурам приурочены характерные минеральные ассоциации: сульфидные, карбонатные и слюдястые минералы (серицит). Для $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования отбирались монофракции серицита из плоскостей слоистости и зальбанд кварцевых жил. В силу отсутствия крупных чешуек серицита в породах со структурами кренуляционно-го кливажа проводился валовый метод анализа.

3. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Месторождение Голец Высочайший расположено на севере Иркутской области в пределах сложно деформированных складчатых структур Байкало-Патомского пояса в Хомолхинском золоторудном узле (рис. 1). В структурном плане месторождение сосредоточено в пределах Хомолхино-Илигирской мегасинклинали, в висячем крыле частично эродированной Каменской флексурной антиклинали третьего порядка [Buryak, Khmelevskaya, 1997; Ivanov, 2014; Vanin, Mazukabzov, 2021] в одном километре на север от ее шарнира (рис. 2).

Золоторудные зоны представлены сульфидизированными (пирит, пирротин) углеродистыми сланцами, в составе которых преобладает серицит, кварц, карбонат при незначительном количестве хлорита. Рудные зоны залегают послойно, имеют падение 5–20° на север и вытянуты в субширотном направлении (рис. 2). Рудовмещающими являются породы нижней и средней подсвиты хомолхинской свиты, представленные переслаиванием темно-серых углеродистых песчаников, пелитов и алевролитов.

Помимо послойных золоторудных зон, на месторождении присутствуют слабозолотоносные, малосульфидные кварцевые жилы (более 1 м). Они часто будинированы и занимают секущее положение по отношению к основным структурным элементам (слоистость и кливаж осевой поверхности) месторождения. Несмотря на единичные находки самородного золота в кварцевых жилах месторождения Голец Высочайший, собственной экономической значимости они не имеют [Buryak, Khmelevskaya, 1997].

Важно отметить, что на территории месторождения Голец Высочайший и на большей части Байкало-Патомского нагорья черносланцевые толщи были

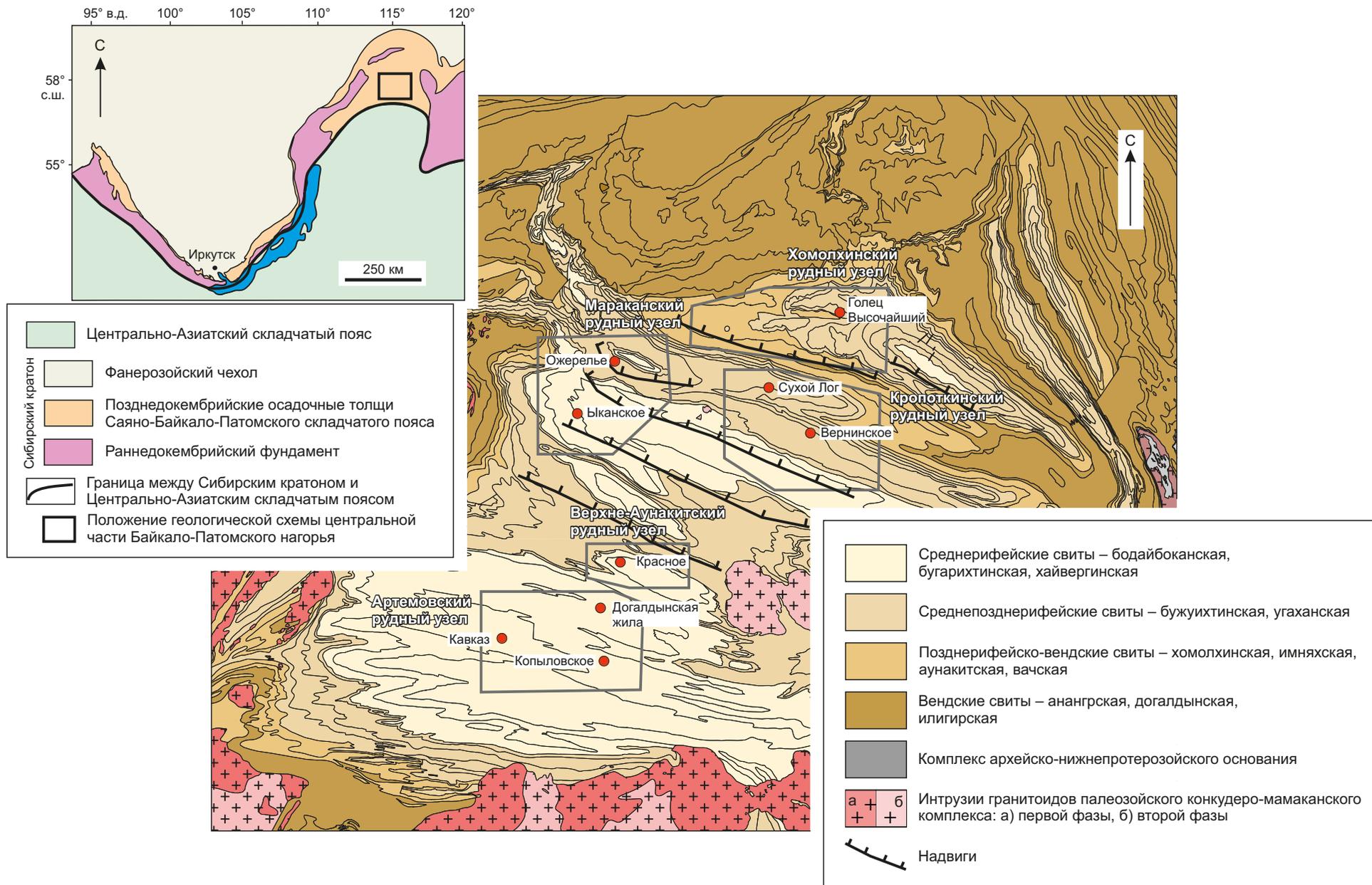


Рис. 1. Обзорная геологическая схема центральной части Байкало-Патомского нагорья.

Fig. 1. An overview geological scheme of the central Baikal-Patom Upland.

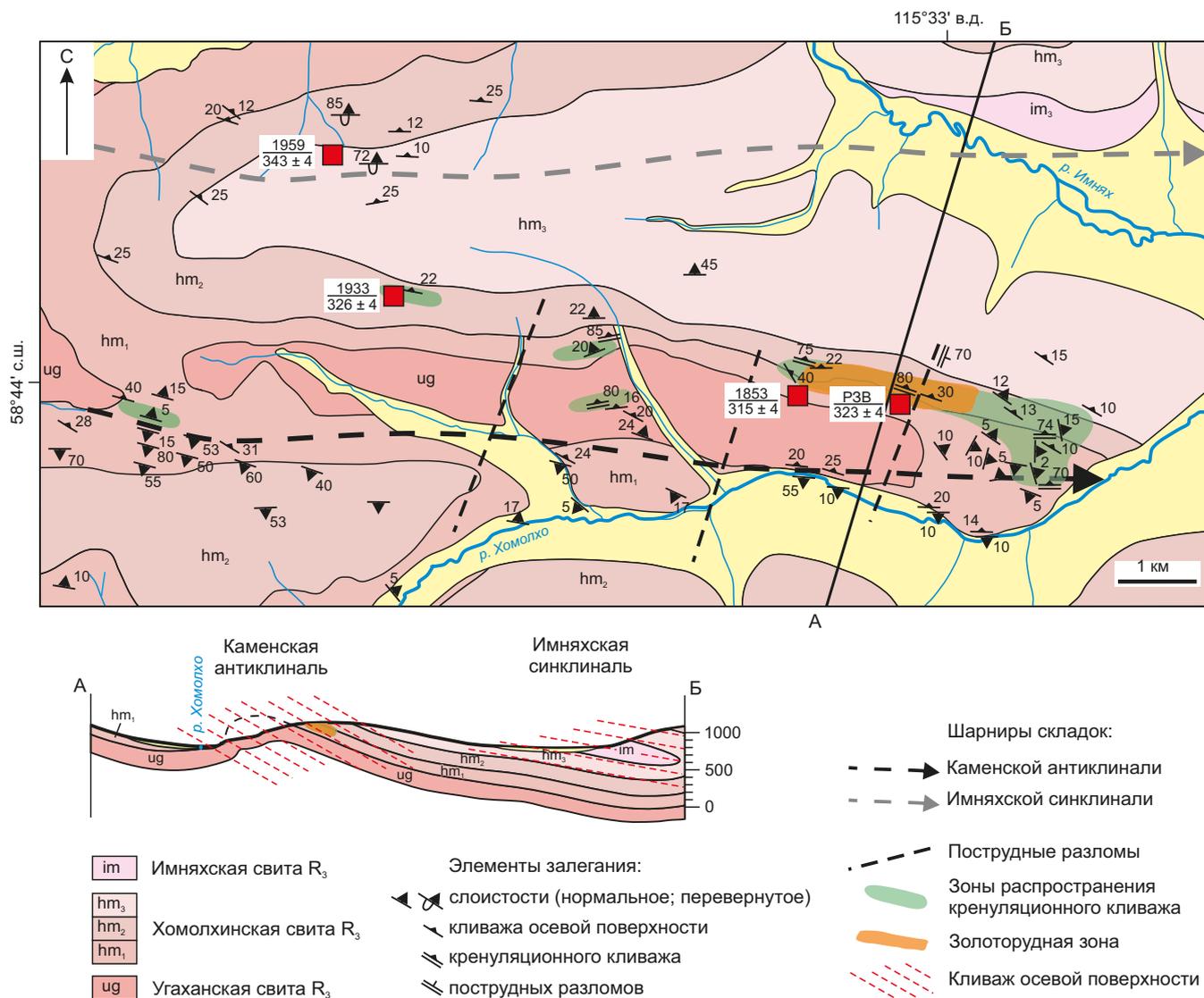


Рис. 2. Геолого-структурная схема месторождения Голец Высочайший (план составлен по фондовым материалам (И.Н. Бирюкова) с дополнениями структурных элементов).

Fig. 2. A geological and structural scheme of the Golets Vysochaishii deposit (compiled from the archive materials (of I.N. Biryukov) with addition of structural elements).

значительно рассланцованы в результате тектонических деформаций. Данное рассланцевание было образовано вследствие деформаций, наложенных на уже сформированную текстуру кливажа ОП. В результате по плоскостям кливажа ОП произошли подвижки, приведшие к ориентировке минеральных агрегатов вдоль данных плоскостей и трансформированию плоскостей кливажа ОП в плоскости сланцеватости [Vanin, Mazukabzov, 2021], в результате чего кливаж ОП в данном случае справедливо рассматривать как сланцеватость, а породы, обладающие этой текстурой, как сланцы.

В разрезе рудовмещающих отложений хомолхинской свиты доминируют алевросланцы, пелиты, пелитовидные микросланцы. Породы преобразованы в хлорит-серицитовый субфации зеленосланцевой фации регионального метаморфизма. В пределах толщи

выделяются углеродсодержащие филлитовидные сланцы и алевролиты.

Углеродсодержащие филлитовидные сланцы серицит-кварцевого и карбонат-кварц-серицитового состава со сланцеватой текстурой, вкрапленностью пирита и линзами пирротина. В составе породы выделяются порфиробласты карбоната (до 5–15 %), в основной ткани серицит (30–55 %), ориентированный длинными сторонами по сланцеватости, мельчайшие длинные зернышки кварца, расположенные согласно со сланцеватостью (35–50 %), углеродистое вещество (около 3–5 % от площади шлифа), образующее прерывистые субпараллельно расположенные прослойки, редко установлен хлорит.

Углеродистые алевросланцы серицит-карбонат-кварцевого состава сходны с филлитовидными углеродистыми микросланцами. Рудные образования приурочены

к контакту углеродсодержащих алевросланцев и филлитов. Зернышки кварца, карбоната и серицита характеризуются удлиненной формой, ориентированы по направлению сланцеватости.

Сульфидная минерализация месторождения Голец Высочайший образована на различных стадиях, характеризующихся разными условиями образования и разделенных во времени. Детальное описание рудной минерализации крупнообъемных золоторудных объектов Бодайбинского района приведено в работах [Large et al., 2007; Meffre et al., 2008; Tauson et al., 2009, 2015; Tarasova et al., 2020, 2021; Palenova et al., 2015; Yudovskaya et al., 2016].

Пирит является основным рудным минералом для подавляющего большинства рудных объектов исследуемого района, в том числе на месторождении Голец Высочайший. На месторождении выделено четыре морфологических разновидности пирита: первые две связаны с дорудным этапом формирования месторождения, характеризуются небольшими размерами (0.0n мм) и примесью золота; третья морфологическая разновидность пирита связана непосредственно с этапом рудообразования и находится в ассоциации с самородным золотом; четвертая имеет наложенный характер, представлена крупными идиоморфными кристаллами, не имеет примеси золота и является пострудной.

Как было описано в работе [Vanin, Mazukabzov, 2021] и упомянуто ранее, в породах месторождения проявлены текстуры слоистости, кливажа ОП и кренуляционного кливажа. К плоскостям слоистости и кливажа ОП приурочены слюдистые минералы (в нашем случае серицит) соответствующей ориентировки. Синтектонический серицит образует самостоятельные сегрегационные обособления линзовидно-полосчатой морфологии,

ориентированные вдоль плоскостей скольжения кливажа ОП (рис. 3). Данная минеральная приуроченность к выделяемым деформационным структурам свидетельствует о том, что серицит является синтектоническим и возраст его формирования соответствует возрасту тектонических движений по этим структурам.

Для определения возраста процессов деформаций $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом было проведено датирование четырех проб. Образцы горных пород для анализа отбирались с таким условием, чтобы они отличались набором проявленных в них тектонических деформаций. Так, проба (обр. 1959) отобрана в 6 км от золоторудной зоны в замке Имняхской синклинали в породах верхней подсвиты хомолхинской свиты (см. рис. 2). Данная проба представляет собой монофракцию серицита, отобранного из плоскости слоистости. Отобранные чешуйки серицита имели ориентировку, соответствующую плоскостям слоистости. В месте отбора пробы проявлены текстуры наложенного сквозного кливажа ОП (рис. 4, а). Кливаж ОП в данном случае является наиболее ранней текстурой, и, соответственно, породы, в которых он развит, являются наименее измененными по отношению к другим изученным образцам.

Проба (обр. 1933) отобрана на удалении 5 км от золоторудной зоны (см. рис. 2). В пробе кроме кливажа ОП присутствует слабо выраженный кренуляционный кливаж (рис. 4, б). Ввиду отсутствия возможности отбора монофракции серицита из данной пробы анализ проводился валовым методом.

Проба (обр. РЗВ) была отобрана из золоторудной зоны с промышленными содержаниями золота в карьере месторождения Голец Высочайший. В пробе присутствует кливаж ОП, деформированный новообразованным кренуляционным кливажом (рис. 4, в). Из-за

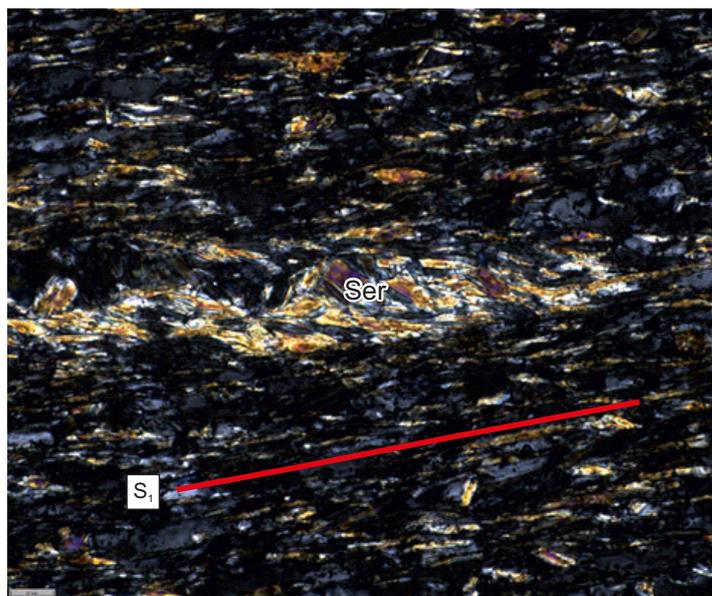


Рис. 3. Структурно-текстурные особенности пород месторождения Голец Высочайший. Ser – серицит, S_1 – кливаж ОП (сланцеватость).

Fig. 3. Structural and textural features of the Golets Vysochaishii deposit rocks. Ser – sericite, S_1 – axial-plane cleavage (schistosity).

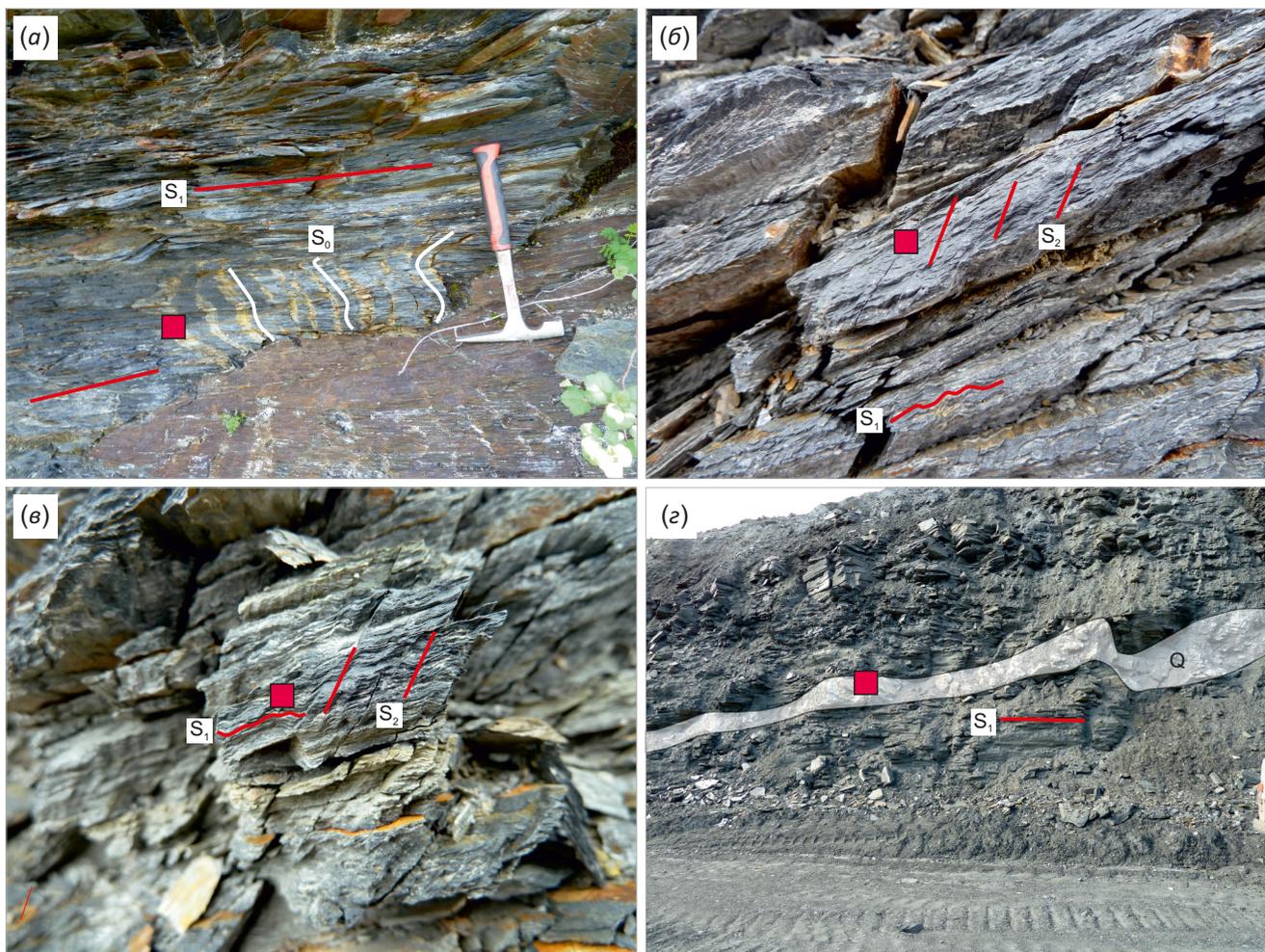


Рис. 4. Места отбора проб в коренных обнажениях для $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ анализа. (а) – место отбора обр. 1959; (б) – место отбора обр. 1933; (е) – место отбора обр. 1853, белым цветом закрашена кварцевая жила; (z) – место отбора обр. P3B. S_0 – слоистость; S_1 – кливаж ОП; S_2 – кренуляционный кливаж.

Fig. 4. Sites of bedrock exposure sampling for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analysis. (a) – 1959 sampling site; (б) – 1933 sampling site; (е) – 1853 sampling site, a white color shows a quartz vein; (z) – P3B sampling site. S_0 – bedding; S_1 – axial-plane cleavage; S_2 – crenulation cleavage.

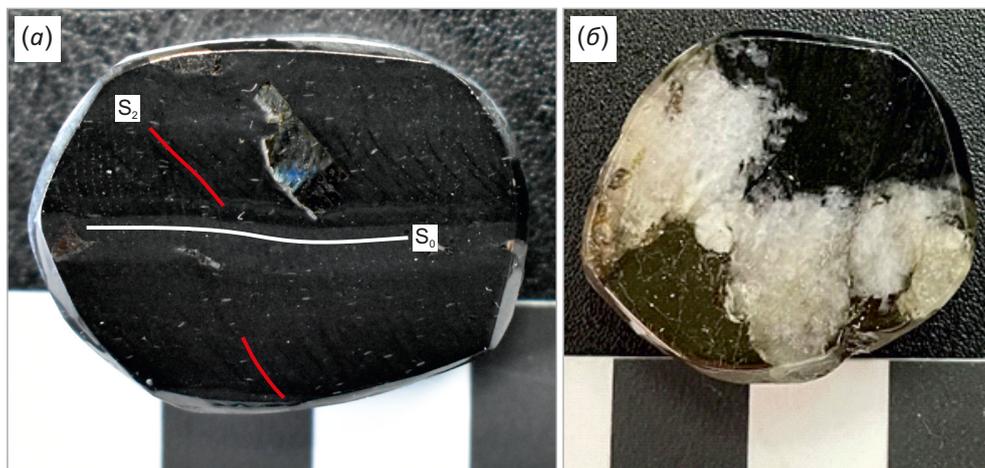


Рис. 5. Взаимоотношения пирита и пирротина с вмещающими породами, характерные для месторождения Голец Высочайший. (а) – обр. P3B; (б) – обр. 1853.

Fig.5. Pyrite and pyrrhotite interaction with the host rocks, typical of the Golets Vysochaishii deposit. (a) – P3B sample; (б) – 1853 sample.

отсутствия каких-либо крупных частиц серицита в пробах также применялся валовый метод анализа.

Наличие кренуляционного кливажа в пробах (обр. 1933 и обр. РЗВ) свидетельствует о том, что на данные породы были наложены дополнительные деформации. Соответственно породы, в которых развит кренуляционный кливаж, являются наиболее измененными и должны демонстрировать более поздний возраст по отношению к деформациям, проявленным в месте отбора (обр. 1959).

В изучаемой пробе (обр. РЗВ) присутствуют единичные кристаллы идиоморфного пирита, который согласно предложенной классификации [Tarasova et al., 2021] идентифицируется как пирит-IV и является наложенным относительно рудной минерализации месторождения (рис. 5, а). Аналогичные формы выделения пирита широко наблюдаются по всей территории Бодайбинского района и также относятся к пострудному пириту [Large et al., 2007; Meffre et al., 2008; Tauson et al., 2015; Yudovskaya et al., 2016; Tarasova et al.,

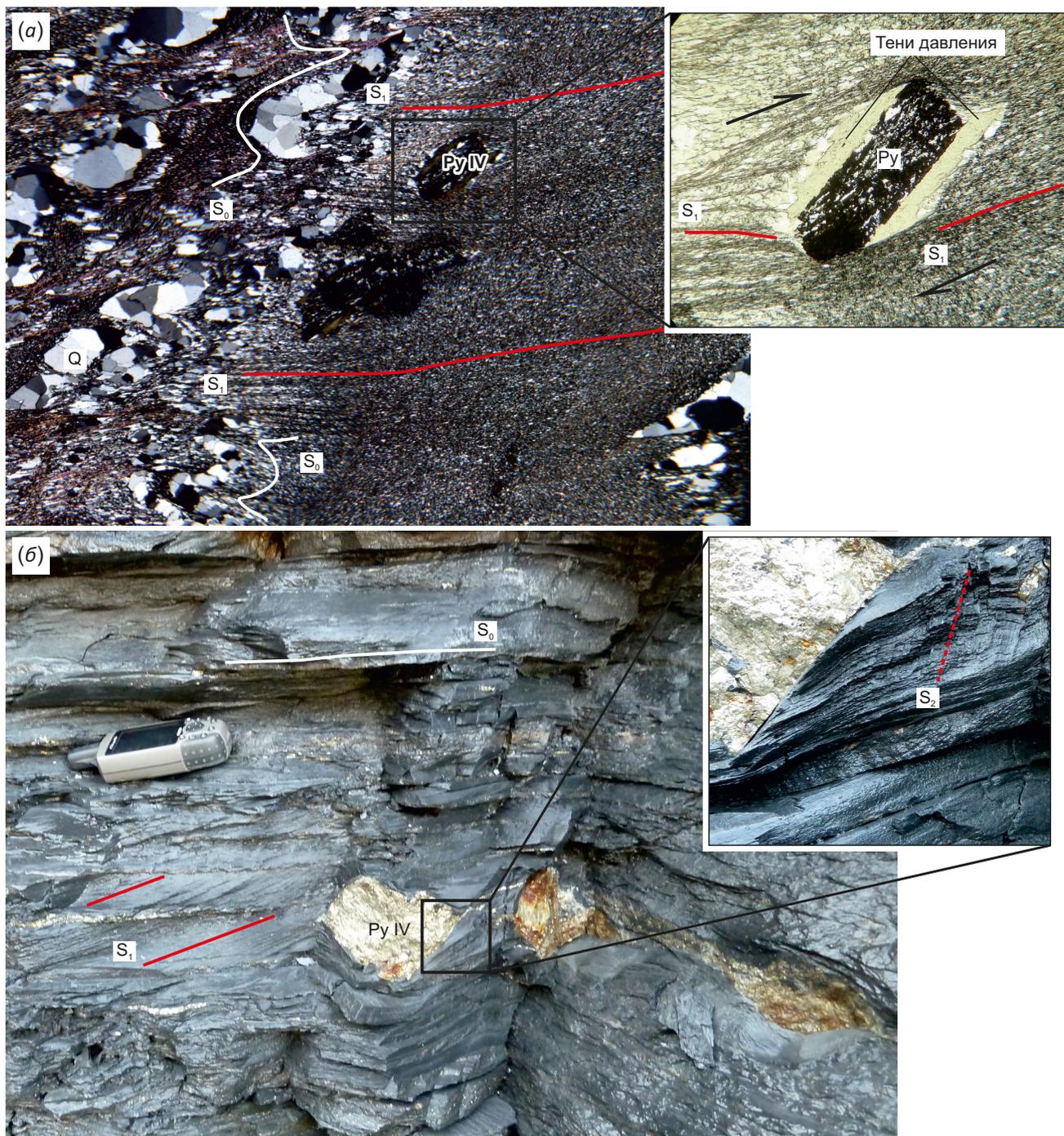


Рис. 6. Положение и деформации пирита-IV в породах месторождения Голец Высочайший. Условные обозначения см. на рис. 4.
 Fig. 6. Pyrite-IV location and deformations in the Golets Vysochaishii deposit rocks (see Fig. 4 for notations).

2020]. Пирит подвержен деформациям с образованием теней давления в результате ротации (рис. 6, а). Одновременно во вмещающих пирит сланцах возник дискретно проявленный кренуляционный кливаж (рис. 6, б, врезка).

Проба (обр. 1853) представляет собой монофракцию серицита, отобранную в зальбандах кварцевой жилы. Место отбора – юго-западная стенка карьера за пределами золоторудных зон (см. рис. 2). Кварцевая жила пересекает породы ранней подсвиты хомолхинской свиты и занимает секущее положение по отношению к слоистости и кливажу ОП (см. рис. 4, г; рис. 5, б). Секущее положение кварцевых жил свидетельствует об их более позднем формировании относительно подвижек по плоскостям слоистости и кливажа ОП. Соответственно, серицит из зальбанд кварцевых жил (обр. 1853) должен демонстрировать более поздний возраст по отношению к обр. 1959. Взаимоотношения кварцевых жил с кренуляционным кливажом в пределах месторождения не наблюдались. При этом, согласно изотопным исследованиям, значения $\delta^{34}\text{S}$ для пирита-IV (пирит, сформированный в то же время, когда был сформирован кренуляционный кливаж [Vanin, Mazukabzov, 2021]) и пирита-IVQ (пирит в секущих кварцевых жилах) свидетельствуют о том, что пирит-IV и пирит-IVQ формировались в один этап из единого источника [Tarasova et al., 2021].

4. РЕЗУЛЬТАТЫ $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Датирование межслоевого серицита (обр. 1959) в замке крупной Имняжской синклинали (см. рис. 2; рис. 4, а), отобранного в верхней подсвите хомолхинской свиты, дало возраст плато 343 ± 4 млн лет (рис. 7; табл. 1). Поскольку чешуйки серицита расположены и ориентированы по плоскостям слоистости, полученный возраст плато соответствует возрасту формирования слюды или перенастройке изотопной системы в результате межслоевых скользящих.

Датирование валовой пробы серицитизированных сланцев с развитым в них кренуляционным кливажом (см. рис. 4 б, в) в средней подсвите хомолхинской свиты за пределами месторождения (обр. РЗВ) и в пределах карьера месторождения (обр. РЗВ) дало возраст плато 326 ± 4 и 325 ± 4 млн лет (рис. 7; табл. 1) соответственно. Датирование слюды (обр. 1853), отобранной в зальбандах кварцевой жилы (см. рис. 4, г), демонстрирует возраст 321 ± 4 млн лет (рис. 7; табл. 1). Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования приведены в табл. 1.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из приведенных в настоящей работе $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ данных возраста слюдистых минералов – индикаторов тектонических процессов в совокупности с геологоструктурными наблюдениями становится очевидным,

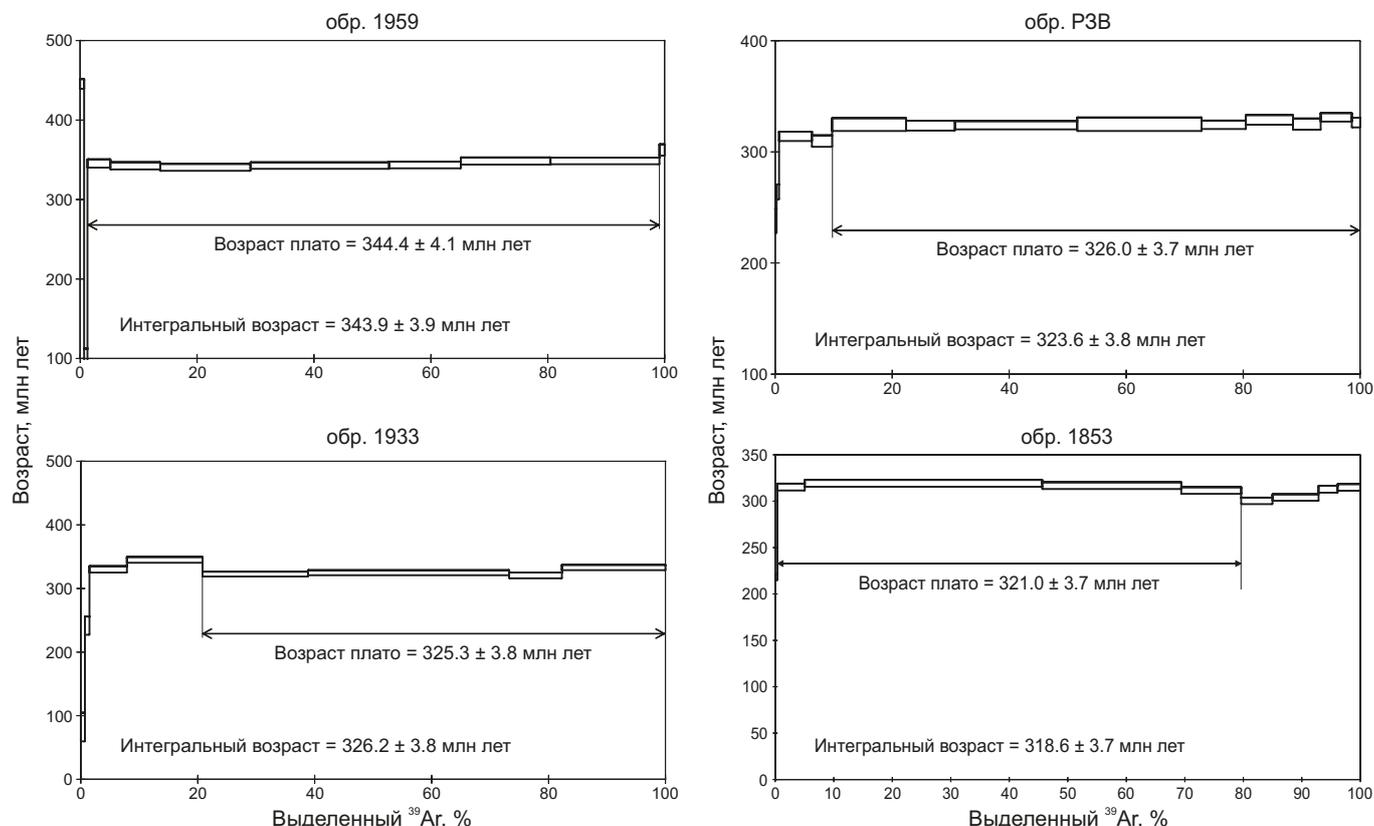


Рис. 7. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраст, полученный по синтетектоническим слюдам и валовым образцам из пород месторождения Голец Высочайший.

Fig. 7. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age obtained based on syntectonic micas and bulk samples from the Golets Vysochaishtii deposit rocks.

Таблица 1. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования слюд из пород месторождения Голец Высочайший
Table 1. The results for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of micas from the Golets Vysochaishii deposit rocks

T, °C (%)	t, min возраст, млн лет	^{40}Ar , 10^{-9} см^3 STP±1?	$^{40}\text{Ar}/$ ^{39}Ar	±1σ	$^{38}\text{Ar}/$ ^{39}Ar	±1σ	$^{37}\text{Ar}/$ ^{39}Ar	±1σ	$^{36}\text{Ar}/$ ^{39}Ar	±1σ	Ca/K	$\Sigma^{39}\text{Ar}$ (%)	Возраст, млн лет	±1σ
1853 слюда (19.72 мг), J=0.004842±0.000061; возраст = 318.6±3.7 млн лет														
00	10	5.2	6.0	0.01	0.053	0.00198	7.372	0.438	0.0183	0.0015	26.5	0.3	5.3	3.8
00	10	35.5	36.2	0.07	0.040	0.00153	4.276	0.714	0.0107	0.0017	15.4	0.7	267.5	4.9
800	10	513.2	43.4	0.01	0.018	0.00016	0.663	0.041	0.0105	0.0003	2.4	5.4	321.8	3.8
850	10	4192.7	40.9	0.01	0.014	0.00001	0.265	0.006	0.0008	0.0001	1.0	45.8	323.9	3.7
900	10	2427.7	40.4	0.01	0.015	0.00003	0.325	0.006	0.0004	0.0002	1.2	69.5	321.6	3.7
950	10	1033.9	39.9	0.01	0.017	0.00006	0.666	0.016	0.0009	0.0003	2.4	79.7	316.8	3.7
1000	10	525.4	38.9	0.02	0.021	0.00016	1.042	0.049	0.0022	0.0006	3.8	85.0	306.4	3.8
1050	10	776.3	39.0	0.01	0.020	0.00006	1.023	0.018	0.0024	0.0002	3.7	92.9	306.9	3.6
1100	10	331.3	40.3	0.01	0.016	0.00005	0.554	0.068	0.0017	0.0003	2.0	96.1	318.1	3.7
1130	10	398.1	40.4	0.01	0.017	0.00013	0.619	0.059	0.0031	0.0003	2.2	100.0	315.7	3.7
1933 вал (97.96 мг), J=0.004801±0.000060; возраст = 326.2±3.8 млн лет														
500	10	7.8	26.6	0.248	0.017	0.00351	1.81	1.19	0.0572	0.00922	6.5	0.7	82.1	22.6
600	10	13.3	40.6	0.266	0.016	0.00705	3.59	1.68	0.0364	0.00627	12.9	1.5	241.5	14.4
700	10	116.6	43.1	0.073	0.010	0.00022	0.31	0.26	0.0045	0.00162	1.1	7.9	330.1	5.1
800	10	242.1	44.4	0.059	0.009	0.00044	0.00	0.08	0.0017	0.00108	0.01	20.8	345.0	4.6
900	10	316.8	41.6	0.022	0.011	0.00025	0.10	0.05	0.0028	0.00042	0.36	38.9	322.6	3.8
1000	10	601.9	41.5	0.029	0.011	0.00034	0.02	0.02	0.0013	0.00059	0.07	73.3	324.8	3.9
1075	10	159.2	41.9	0.073	0.013	0.00101	0.08	0.11	0.0046	0.00123	0.3	82.3	320.6	4.6
1150	10	317.5	42.5	0.044	0.013	0.00052	0.18	0.10	0.0009	0.00079	0.6	100.0	332.9	4.2
1959 вал (214.07 мг), J=0.004758±0.000059; возраст = 343.9±3.9 млн лет														
500	10	29.8	70.4	0.166	0.018	0.00220	0.01	0.12	0.0392	0.00181	0.03	0.7	445.3	6.1
590	10	9.3	26.4	0.568	0.034	0.00359	0.38	0.32	0.0654	0.02157	1.4	1.2	59.7	52.9
700	10	116.5	47.5	0.081	0.012	0.00167	0.08	0.07	0.0106	0.00169	0.3	5.2	345.3	5.3
790	10	240.9	45.2	0.056	0.011	0.00071	0.13	0.03	0.0042	0.00109	0.47	13.7	342.4	4.5
850	10	427.5	44.3	0.047	0.011	0.00065	0.06	0.03	0.0024	0.00095	0.23	29.1	340.4	4.3
900	10	660.2	44.5	0.036	0.011	0.00044	0.02	0.01	0.0019	0.00072	0.06	52.8	342.7	4.2
950	10	344.0	44.9	0.072	0.010	0.00057	0.04	0.03	0.0027	0.00071	0.1	65.1	343.4	4.2
1050	10	431.3	45.0	0.057	0.011	0.00044	0.07	0.05	0.0007	0.00106	0.3	80.5	348.4	4.5
1150	10	529.3	45.4	0.026	0.010	0.00033	0.02	0.01	0.0022	0.00053	0.1	99.1	348.5	4.1
1250	10	34.9	62.3	0.178	0.020	0.00257	0.81	0.18	0.0525	0.00284	2.9	100.0	362.4	7.2
PЗВ вал (211.9 мг), J=0.004668±0.000057; возраст = 323.6±3.8 млн лет														
500	10	17.1	49.0	0.238	0.028	0.00312	0.59	0.18	0.0635	0.00487	2.1	0.3	238.0	11.0
600	10	23.8	41.9	0.140	0.012	0.00282	0.23	0.19	0.0276	0.00274	0.8	0.7	264.0	6.7
700	10	331.7	42.3	0.065	0.012	0.00039	0.18	0.03	0.0055	0.00111	0.7	6.3	314.0	4.2
700	10	202.6	42.1	0.081	0.013	0.00054	0.27	0.04	0.0068	0.00181	0.96	9.7	309.7	5.2
850	10	752.6	42.7	0.101	0.010	0.00029	0.18	0.01	0.0017	0.00214	0.65	22.4	324.6	5.8
850	10	499.9	43.1	0.052	0.011	0.00029	0.15	0.01	0.0033	0.00117	0.54	30.7	323.6	4.4
925	10	1247.0	42.8	0.048	0.011	0.00023	0.08	0.005	0.0023	0.00038	0.3	51.6	323.9	3.7
975	10	1263.1	42.6	0.106	0.010	0.00016	0.01	0.01	0.0013	0.00230	0.03	72.9	324.8	6.0
1010	10	449.1	42.6	0.036	0.010	0.00034	0.004	0.01	0.0014	0.00053	0.01	80.5	324.4	3.8
1050	10	484.2	43.1	0.074	0.014	0.00025	0.06	0.02	0.0011	0.00111	0.2	88.5	328.7	4.4
1090	10	287.5	43.6	0.078	0.013	0.00052	0.06	0.04	0.0043	0.00166	0.2	93.3	325.0	5.0
1150	10	324.7	43.9	0.024	0.011	0.00046	0.06	0.04	0.0026	0.00042	0.2	98.6	331.0	3.8
1200	10	89.1	44.7	0.052	0.015	0.00130	0.20	0.12	0.0074	0.00115	0.7	100.0	326.4	4.4

Примечание. Аналитик Д.С. Юдин, Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск.

Note. Analyzer – D.S. Yudin, Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk.

что $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ метод анализа монофракций серицита в данном случае фиксирует исключительно герцинские события (340–320 млн лет). Более ранние события, произошедшие на раннепалеозойском тектоническом этапе (450–440 млн лет), известном по литературным источникам [Laverov et al., 2007; Yudovskaya et al., 2011; Tarasova et al., 2021], $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом по синтетическому серициту зафиксировать не удалось.

Возраст плато 343 ± 4 млн лет, полученный для межслоевого серицита в обр. 1959 соответствует возрасту формирования серицита или перенастройки его изотопной системы в результате межслоевых скольжений. Полученный возраст является наиболее древним по отношению к другим исследованным пробам, что соответствует структурным наблюдениям. Наличие кливажа ОП без дополнительных наложенных структур свидетельствует о том, что в месте отбора датированной пробы более поздние деформации не проявлены.

Датирование серицитизированных сланцев (обр. 1933 и обр. РЗВ) с развитыми в них структурами кренуляционного кливажа (см. рис. 4, б, в) дало возраст плато 326 ± 4 и 325 ± 4 млн лет соответственно (рис. 7). Поскольку кренуляционный кливаж является индикатором более поздних наложенных деформационных событий, вероятно, разница в возрасте 17–20 млн лет в сторону омоложения для обр. 1933 и обр. РЗВ связана именно с наложением более поздних деформаций.

Датирование слюды (обр. 1853), отобранной в залбандах малосульфидной кварцевой жилы, демонстрирует также более поздний возраст – 321 ± 4 млн лет и отражает возраст формирования разрывных нарушений и заполнение их кварцевым материалом (см. рис 4, г). Данное утверждение подтверждается наличием в этих пробах пирита-IV и пирита-IVQ, которые, согласно [Tarasova et al., 2021], формировались синхронно из единого источника.

Соответственно, последовательность проявления тектонических импульсов в герцинское время, установленная посредством геолого-структурных наблюдений, подтверждается результатами минералогического изучения проб, а также изотопно-геохронологического $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ анализа слюд, связанных с деформационными структурами. Полученная разница в возрасте в ~20 млн лет между тектоническими событиями, проявленными в виде межслоевых скольжений, и формированием кренуляционного кливажа, а также проявлением секущих кварцевых жил, вероятно, отражает дискретность тектонической активности в герцинское время.

Зафиксированный герцинский этап тектонических деформаций надежно вписывается в предложенную модель формирования месторождений в пределах Бодайбинского района [Nemerov et al., 2010; Chugaev et al., 2014; Tarasova et al., 2020]. Согласно предложенной схеме, в раннепалеозойский (поздний ордовик – силур) тектонический этап (450–440 млн лет) на фоне коллизионно-аккреционных процессов была сформирована основная складчатая структура рассматриваемого района с образованием сжатых лежащих и флексурных

антиклинальных складок. Замки и крылья последних являются структурными ловушками для прожилково-вкрапленной золоторудной минерализации. В заключительную стадию этого этапа был сформирован сквозной кливаж, субпараллельный осевой поверхности складок.

Этап тектонической активизации, который удалось зафиксировать в данной статье, проявился в период 340–320 млн лет. Согласно [Large et al., 2007; Tarasova et al., 2021], процессы этого этапа носят пострудный наложенный характер и их влияние на перераспределение золота в пределах месторождения незначительно. Тем не менее деформации, связанные с тектонической активизацией герцинского времени, в определенной степени усложнили сформированную структуру не только месторождения Голец Высочайший, но и прилегающей территории.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведения детального структурно-геохронологического анализа и изотопно-геохронологического $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования деформаций, проявленных на месторождении Голец Высочайший, зафиксированы два тектонических импульса – 340 и 320 млн лет герцинского этапа. Этот этап тектонической активизации характеризуется последовательным осложнением покровно-складчатой структуры рассматриваемого района. Осложнение структуры района началось с образования будинаж-структур, формирования мелкой складчатости на крыльях и в замках крупных складок, процессов скольжения по плоскостям слоистости и по плоскостям сквозного кливажа ОП (340 млн лет). В результате последующих тектонических событий был сформирован дискретно проявленный наложенный кренуляционный кливаж, а также произошло формирование слабозолотоносных малосульфидных кварцевых жил, занимающих секущее положение по отношению к элементам слоистости и кливажа ОП (320 млн лет).

7. БЛАГОДАРНОСТИ / ACKNOWLEDGMENT

В работе задействовалось оборудование ЦКП «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН (грант № 075-15-2021-682).

This work involved equipment of the Shared Research Facilities "Geodynamics and Geochronology" of the Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (grant 075-15-2021-682).

8. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

9. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- 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).
- Bryukhanova N.N., Bychinskii V.A., Budyak A.E., 2014. Thermodynamic Model of the Ore Stage in the Formation of the Sukhoi Log Deposit. *Doklady Earth Sciences* 455, 296–298. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14030143>.
- Bryukhanova N.N., Bychinskij V.A., Budyak A.E., Chudnenko K.V., 2020. Physical-Chemical Modeling of the Ore-Forming Fluid of the Sukhoi Log Deposit. *Geosphere Research* 4, 25–32 (in Russian) [Брюханова Н.Н., Бычинский В.А., Будяк А.Е., Чудненко К.В. Физико-химическое моделирование рудообразующего флюида месторождения Сухой Лог (Иркутская область, Россия) // Геосферные исследования. 2020. № 4. С. 25–32]. <https://doi.org/10.17223/25421379/17/2>.
- Buryak V.A., Khmelevskaya N.M., 1997. Sukhoi Log, One of the Largest Gold Deposits in the World: Genesis, Mineralization Distribution Patterns, and Forecasting Criteria. *Dal'nauka, Vladivostok*, 156 p. (in Russian) [Буряк В.А., Хмелевская Н.М. Сухой Лог – одно из крупнейших золоторудных месторождений мира (генезис, закономерности размещения оруденения, критерии прогнозирования). Владивосток: Дальнаука, 1997. 156 с.].
- Chugaev A.V., Plotinskaya O.Yu., Chernyshev I.V., Kotov A.A., 2014. Lead Isotope Heterogeneity in Sulfides from Different Assemblages at the Verninskoe Gold Deposit (Baikal-Patom Highland, Russia). *Doklady Earth Sciences* 457, 887–892. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14070216>.
- Ivanov A.I., 2014. Baikal-Patom Gold (Geology, Mineralization, and Prospects). Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow, 215 p. (in Russian) [Иванов А.И. Золото Байкало-Патома (геология, оруденение, перспективы). М.: ФГУП ЦНИГРИ, 2014. 215 с.].
- Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danyushevsky L., Chang Z., 2007. Multistage Sedimentary and Metamorphic Origin of Pyrite and Gold in the Giant Sukhoi Log Deposit, Lena Gold Province, Russia. *Economic Geology* 102 (7), 1233–1267. <http://dx.doi.org/10.2113/gsecongeo.102.7.1233>.
- Laverov N.P., Chernyshev I.V., Chugaev A.V., Bairova E.D., Gol'tsman Y.V., Distler V.V., Yudovskaya M.A., 2007. Formation Stages of the Large-Scale Noble Metal Mineralization in the Sukhoi Log Deposit, East Siberia: Results of Isotope-Geochronological Study. *Doklady Earth Sciences* 415, 810–814. <https://doi.org/10.1134/S1028334X07050339>.
- Meffre S., Large R.R., Scott R., Woodhead J., Chang Z., Gilbert S.E., Danyushevsky L.V., Maslennikov V., Hergt J.M., 2008. Age and Pyrite Pb-Isotopic Composition of the Giant Sukhoi Log Sediment-Hosted Gold Deposit, Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 72, 2377–2391. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.03.005>.
- Nemerov V.K., Stanevich A.M., Razvozzhaeva E.A., Budyak A.E., Kornilova T.A., 2010. Biogenic Sedimentation Factors of Ore Formation in the Neoproterozoic Strata of the Baikal-Patom Region. *Russian Geology and Geophysics* 51 (5), 572–586 <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.04.012>.
- Palenova E.E., Belogub E.V., Novoselov K.A., Maslennikov V.V., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., Plotinskaya O.Y., Griboedova I.G., Kuzmenko A.A., 2015. Chemical Evolution of Pyrite at the Kopylovsky and Kavkaz Black Shale-Hosted Gold Deposits, Bodaybo District, Russia: Evidence from EPMA and LA-ICP-MS Data. *Geology of Ore Deposits* 57, 64–84. <https://doi.org/10.1134/S107570151501002X>.
- Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., Reutsky V.N., Bryukhanova N.N., Gareev B.I., 2020. Mineralogical and Isotope-Geochemical ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$ and Pb-Pb) Characteristics of the Krasniy Gold Mine (Baikal-Patom Highlands): Constraining Ore-Forming Mechanisms and the Model for Sukhoi Log-Type Deposits. *Ore Geology Reviews* 119, 103365. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365>.
- Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Ivanov A.V., Goryachev N.A., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Radomskaya T.A., Blinov A.V., Babyak V.N., 2021. Typomorphism, Typochemistry, and Isotope-Geochemical Characteristics of Iron Sulfides of the Golets Vysochaisky Deposit (Eastern Siberia). *Proceedings of the Russian Mineralogical Society* 150 (1), 63–75 (in Russian) [Тарасова Ю.И., Будяк А.Е., Иванов А.В., Горячев Н.А., Игнатъев А.В., Веливецкая Т.А., Радомская Т.А., Блинов А.В., Бабяк В.Н. Типоморфизм, типохимизм и изотопно-геохимические характеристики сульфидов железа месторождения Голец Высочайший (Восточная Сибирь) // Записки Российского минералогического общества. 2021. Т. 150. № 1. С. 63–75]. <https://doi.org/10.31857/S0869605521010123>.
- Tarasova Yu.I., Sotskaya O.T., Skuzovatov S.Y., Vanin V.A., Kulikova Z.I., Budyak A.E., 2016. Mineralogical and Geochemical Evidence for Multi-Stage Formation of the Chertovo Koryto Deposit. *Geodynamics & Tectonophysics* 7 (4), 663–677 (in Russian) [Тарасова Ю.И., Соцкая О.Т., Скузватов С.Ю., Ванин В.А., Куликова З.И., Будяк А.Е. Минералого-геохимические свидетельства полистадийности формирования месторождения Чертово Корыто // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 4. С. 663–677]. <https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-4-0227>.
- Tauson V.L., Akimov V.V., Lipko S.V., Spiridonov A.M., Budyak A.E., Belozeroва O.Yu., Smagunov N.V., 2015. Typomorphism of Pyrite of the Sukhoi Log Deposit (East Siberia). *Russian Geology and Geophysics* 56 (10), 1394–1413. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.09.003>.
- Tauson V.L., Nemerov V.K., Razvozzhaeva E.A., Spiridonov A.M., Lipko S.V., Budyak A.E., 2009. Paragenetic Relationships between Pyrite, Carbon, and Gold at the Sukhoi Log Deposit and Typomorphism of the Pyrite Surface. *Doklady Earth Sciences* 426, 690–694. <https://doi.org/10.1134/S1028334X09040400>.
- 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>.

Vanin V.A., Mazukabzov A.M., 2021. Structure of the Golets Vysochaishy Gold Deposit (Northern Transbaikalia). *Geodynamics & Tectonophysics* 12 (1), 60–75 (in Russian) [Ванин В.А., Мазукабзов А.М. Структура золоторудного месторождения Голец Высочайший (Северное Забайкалье) // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 1. С. 60–75]. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-1-0512>.

Yakubchuk A., Stein H., Wilde A., 2014. Results of Pilot Re–Os Dating of Sulfides from the Sukhoi Log and Olympiada Orogenic Gold Deposits, Russia. *Ore Geology Reviews*

59, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.12.003>.

Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokof'ev V.Y., Akinfiyev N.N., 2016. Gold Mineralization and Orogenic Metamorphism in the Lena Province of Siberia as Assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log Deposits. *Geoscience Frontiers* 7 (3), 453–481. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.010>.

Yudovskaya M.A., Distler V.V., Rodionov N.V., Mokhov A.V., Antonov A.V., Sergeev S.A., 2011. Relationship between Metamorphism and Ore Formation at the Sukhoi Log Gold Deposit Hosted in Black Slates from the Data of U-Th-Pb Isotopic Shrimp-Dating of Accessory Minerals. *Geology of Ore Deposits* 53, 27–57. <https://doi.org/10.1134/S1075701511010077>.