

ПЕТРОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ

УДК 550.93:552.3

ГЕОХРОНОЛОГИЯ МЕЗОЗОЙСКОГО ЩЕЛОЧНОГО МАГМАТИЗМА ДЛЯ ТЫРКАНДИНСКОЙ И АМГИНСКОЙ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗОН (АЛДАНСКИЙ ЩИТ): НОВЫЕ U-Pb И Ar-Ar ДАННЫЕ



А.В. Пономарчук¹, И.Р. Прокопьев^{1,2}, А.Г. Дорошкевич¹, Д.В. Семенова¹,
А.А. Кравченко^{3,4}, А.И. Иванов³

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

³Институт геологии алмаза и благородных металлов, Якутск, Россия

⁴Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Амосова, Якутск, Россия

Исследуется Ar-Ar и U-Pb геохронология мезозойского щелочного магматизма Тыркандинской и Амгинской тектонических зон на примере Желтулинского и Верхнеамгинского массивов соответственно. Полученные результаты ограничивают диапазон мезозойского щелочного магматизма Амгинской зоны тектонического меланжа интервалом 139–117 млн лет, а Тыркандинской зоны тектонического меланжа – интервалом 121–111 млн лет. Обнаруженные в щелочных сиенитах Верхнеамгинского массива цирконы свидетельствуют о наличии трех кластеров возрастов: 1,9–2,1, 2,4–2,6 и 2,7–2,9 млрд лет соответственно. При этом примерно 70% точек соответствует второй группе возрастов.

Ключевые слова: Алданский щит, Ar-Ar датирование, датирование щелочных пород, мезозойский магматизм, датирование золоторудных месторождений.

Введение

Территория Алдано-Станового щита является крупным промышленным регионом скопления золоторудных объектов, связанных с проявлением поздне-мезозойского щелочного магматизма [Билибин, 1958; Бойцов, Пилипенко, 1998; Ветлужских и др., 2002; Максимов, 2003; Казанский, 2004; Кочетков, 2006; Дворник 2009; Максимов и др., 2010; Кравченко и др., 2014; Прокопьев и др., 2018; Khomich et al., 2014, 2016; Goryachev, Pirajno, 2014; Prokopyev et al., 2019]. Рудоносный щелочной магматизм на Алданском щите попадает в возрастной интервал 160–115 млн лет и представлен широким набором высококальциевых пород: щелочными сиенитами и сиенит-порфирами, монцонитами, лейцитовыми и нефелиновыми сиенитами, лампрофирами, биотитовыми пироксенитами и шонкинитами, а также щелочными и субщелочными базитами и гранитоидами [Богатиков и др., 1985; Владыкин, 1997; Панина, 1997; Максимов, 2003; Казанский, 2004; Кочетков, 2006; Дворник, 2009; Максимов и др., 2010; Прокопьев и др., 2018; Пономарчук и др., 2019; Borisenko et al., 2011; Mitchell et al., 1994; Prokopyev et al., 2019].

Золотое оруденение, ассоциирующее с калиевыми щелочными породами, проявлено в различных геодинамических обстановках – от магматических дуг до внутриплитного магматизма [Müller, Grouves, 2019]. Изучение радиогенных изотопов (Rb, Sr, Sm,

Nd) указывает на существование древнего, обогащенного в результате процессов субдукции 2,7–2,5 млрд лет назад мантийного источника [Bogatikov et al., 1994; Doroshkevich et al., 2018; Mitchell et al., 1994]. Реактивация Алданского щита, происходившая неоднократно в течение геологической истории, позволяет проследить эволюцию этого источника. Другие современные геодинамические данные показывают, что формирование мезозойского щелочного магматизма Алдано-Станового щита связано с влиянием подлитосферного «горячего поля мантии» в виде интенсивного рифтогенеза и внутриплитной вулканоплутонической деятельности, которая была сопряжена с формированием эпиконтинентальных прогибов, впадин и грабенов [Ярмолюк и др., 1995, 2000]. Причиной проявления мезозойской активности на Алдано-Становом щите рядом исследователей считается дегидратация субдуцирующей под Сибирский континент Тихоокеанской плиты и последующий апвеллинг астеносферного вещества, которые привели к деформациям в литосфере и проявлению многоэтапного плюмового магматизма, отвечающего за перенос полезных компонентов и формирование крупных золоторудных месторождений [Khomich et al., 2014, 2015].

В пределах Алдано-Станового щита выделяется несколько локальных рудных районов, в которых золоторудные объекты ассоциируют с проявлением мезозойского щелочного магматизма: Центральное

Алданский, Амгинский, Тыркандинский, Эльконский, Кет-Капский и др. [Дзевановский и др., 1972; Ветлужских, 1990; Максимов, 2003; Прокопьев и др., 2018; Prokoryev et al., 2019].

Исследуемый Желтулинский щелочной массив является основным рудным объектом Тыркандинского золоторудного района и представляет собой расслоенный сиенитовый вулканоплутон, сформированный в несколько фаз внедрения щелочного комплекса в интервале 138–115 млн лет, в пределах которого установлено два типа рудной минерализации: золоторудная и уран-торий-редкоземельная [Кравченко и др., 2014; Прокопьев и др., 2018]. Верхнеамгинский массив, расположенный в Амгинской зоне тектонического меланжа, имеет возраст формирования 117–135 млн лет [Prokoryev et al., 2019]. В публикации приводятся новые данные по геохронологии становления основных фаз массивов и возрасту рудоносных метасоматитов.

Геология

Сибирский кратон образует коллаж микроконтинентов (Тунгусский, Анабарский, Оленекский, Алданский и Становой), ограниченных раннепротерозойскими орогенными складчатыми поясами [Rosen et al., 2002]. Согласно геохронологическим данным, крупные корообразующие события в пределах Сибирского кратона происходили на рубежах 3,5; 3,3; 3,0 и 2,5 млрд лет [Frost et al., 1998; Rosen et al., 2002]. Алдано-Становой щит является южным выступом фундамента Сибирского кратона на поверхность и характеризуется сложным строением. Существует несколько точек зрения на тектоническое районирование Алданского щита. Ряд исследователей делит Алданский щит на Алданский геоблок, а также Чара-Олекминский и Батомгский геоблоки, примыкающие с запада и востока Алданского геоблока соответственно [Котов и др., 2005, 2006, 2017].

Алданский геоблок, в свою очередь, подразделяется на Западно- и Восточно-Алданский (Учурский) мегаблоки, которые представлены практически полностью метаморфизованными породами гранулитовой фации. Центральная часть Алданского щита сложена широко распространенными архейскими и раннепротерозойскими гранитоидами, которые являются преимущественно гранитогнейсами [Великославинский и др., 2011; Ларин и др., 2012]. Пять эпизодов проявления внутриплитного магматизма раннего докембрия, включая формирование гранитоидов А-типа, отчетливо различаются в истории формирования Алданского щита и его складчатого обрамления: 2,62; 2,40–2,52; 2,07; 1,87–1,88 и 1,74–

1,70 млрд лет соответственно. При этом установлено, что гранитоиды образовались в разных геодинамических обстановках – при постколлизиином расширении литосферы (2,64; 1,87–1,88 млрд лет), и анорогенные – вследствие активности мантийных плюмов (2,40–2,52; 2,07 и 1,74–1,70 млрд лет) [Великославинский и др., 2011; Ларин и др., 2012].

В данной работе используется модель тектонического строения Алдано-Станового щита согласно [Парфенов, Кузьмин, 2001], которая выделяет пять супертеррейнов (рис. 1): Западно-Алданский супертеррейн (WA), Центрально-Алданский составной террейн (включающий Нимнырский (ANM), Сутамский (AST)), Восточно-Алданский составной террейн (включающий Батомгинский (EBT) и Учурский (EUC)), а также Тындинский (TN) и Чогарский (CG) супертеррейны [Парфенов, Кузьмин, 2001]. Составные террейны Алдано-Станового щита, в свою очередь, разделены зонами тектонического меланжа: Амгинская (am), Каларская (kl) и Тыркандинская (tr). Исследуемый Желтулинский щелочной массив расположен в пределах докембрийского Учурского гранулит-парагнейсового террейна (EUC) и примыкает к Тыркандинской зоне тектонического меланжа, маркирующей зону раннепротерозойской аккреции молодого кратона – Учурского террейна (EUC) к более древнему Центрально-Алданскому супертеррейну [Парфенов, Кузьмин, 2001] (см. рис. 1).

Тыркандинская зона тектонического меланжа в плане имеет дугообразную форму и протягивается на 1650 км при ширине 50–200 км [Парфенов, Кузьмин, 2001]. В строении зоны участвуют тектонические пластины образованные различными ассоциациями докембрийских пород. Пластины ограничены узкими зонами бластомилонитов, которые в субдолготной ветви насыщены телами докембрийских гранитоидов. Внутри пластин установлено несколько этапов докембрийской складчатости: ранний (связанный с надвигообразованием) – изоклиальная складчатость с падением крыльев складок в северо-восточном направлении и поздний (связанный со сдвиговыми движениями) [Парфенов и Кузьмин, 2001; Мельников и др., 2015]. Для образованных на позднем этапе бластомилонитовых зон установлены левосдвиговые перемещения. В целом на поздних этапах эволюции, вплоть до современного времени, более существенную роль в развитии зоны играли сдвиговые смещения блоков, которые контролировали ее развитие [Мельников и др., 2015]. На востоке Тыркандинской зоны тектонического меланжа обнажаются породы Учурского террейна (EUC, см. рис. 1).

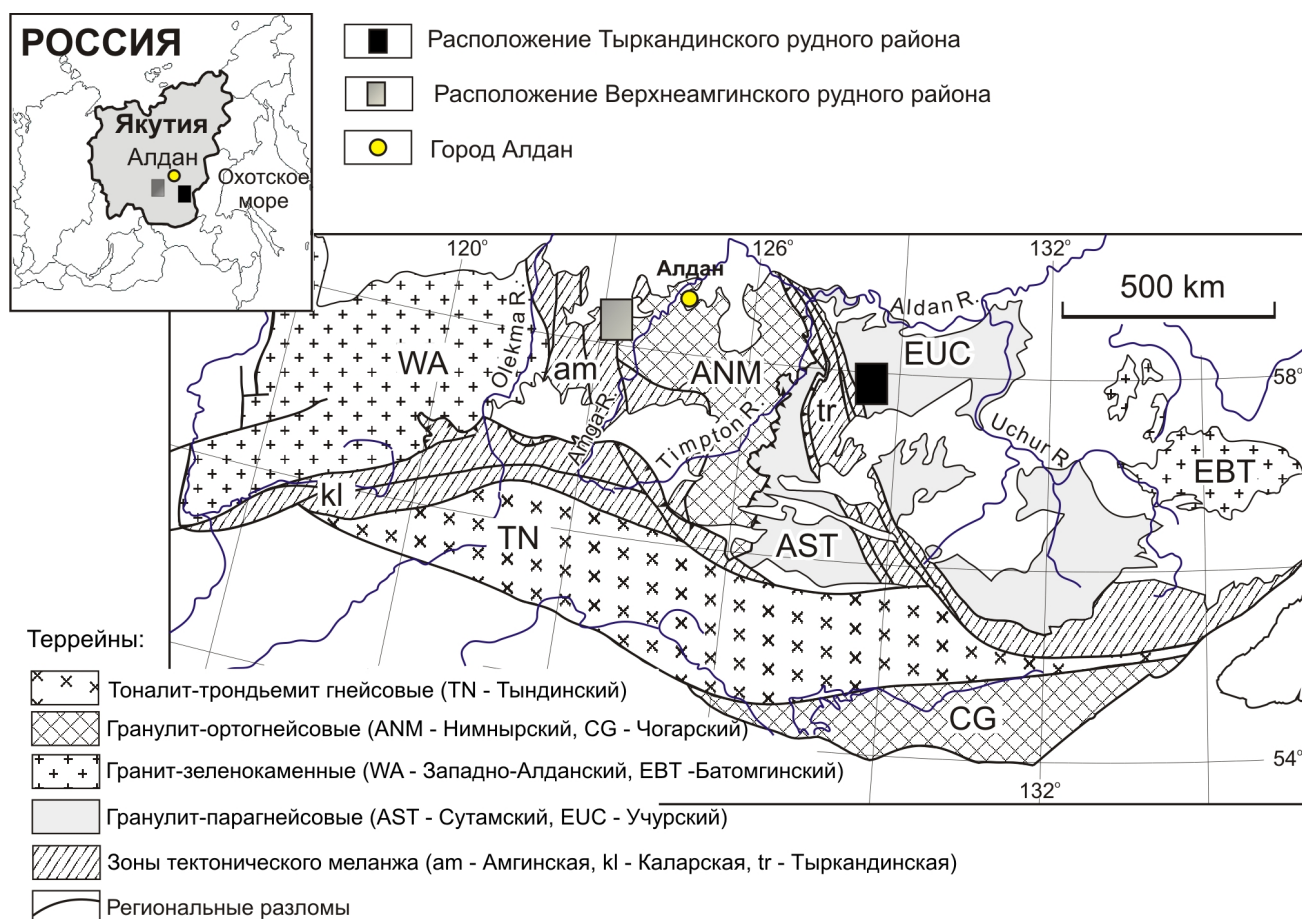


Рис. 1. Схема тектонического строения Алдано-Станового щита
(данные [Парфенов, Кузьмин, 2001; Prokopyev et al., 2019] с дополнениями авторов)

Fig. 1. Scheme of the tectonic structure of the Aldan-Stanovoi shield
(data [Parfenov, Kuzmin, 2001; Prokopyev et al., 2019] with additions of the authors)

Его структурный план определяется гранито-гнейсовыми куполами размером до 150 км в поперечнике [Парфенов и Кузьмин, 2001]. Ядра куполов образованы гранито-гнейсами, чарнокитогнейсами и эндербитогнейсами. Мезозойская тектоно-магматическая активизация в пределах Тыркандинской зоны меланжа унаследовала докембрийские зоны разломов и выразилась в формировании катаклазитов и псевдотахилитов [Парфенов, Кузьмин, 2001; Кравченко и др., 2014]. По форме будин в зонах разломов и смещениям геологических комплексов с псевдотахилитами установлены правосдвиговые перемещения. С формированием правых сдвигов связано возникновение дуплексов растяжения, хорошо проявленных в гравитационном поле и по наличию мезозойских щелочных магматических пород.

Мезозойские магматиты широко представлены полями даек, штоками и крупным Джелтулинским массивом центрального типа, сложенными породами монцонит-сиенитовой и щелочно-сиенитовой формаций разнообразного состава – от диорит-порфиров до нефелиновых сиенитов с преобладанием кварцевых сиенитов, монцонитов и граносиенитов

(рис. 2). Становление интрузивов сопровождалось контактово-метасоматическими и гидротермально-метасоматическими процессами в виде ороговикования, хлоритизации, эпидотизации, серицитизации вмещающих пород, наложенным окварцеванием [Прокопьев и др., 2018]. В щелочных сиенитах Джелтулинского массива проявлены процессы щелочного метасоматоза: альбитизации, серицитизации, эгиринизации, выщелачивания и цеолитизации. Именно к ареалам мезозойских магматических пород тяготеют все известные в пределах района россыпи золота и золоторудные проявления.

Верхнеамгинский щелочной массив находится в 120 км к западу от г. Алдана, в северо-западной части Алданского нагорья, в верхнем течении бассейна р. Амга (приток р. Алдан). Территория исследуемого района по современным тектоническим данным входит в состав Амгинской субмеридиональной структурной зоны тектонического меланжа, разделяющей два крупных мегаблока Алдано-Станового щита – Западно-Алданский гранит-зеленокаменный составной террейн (с запада) и Нимнырский гранулит-ортогнейсовый (с востока) [Парфенов, Кузьмин, 2001].

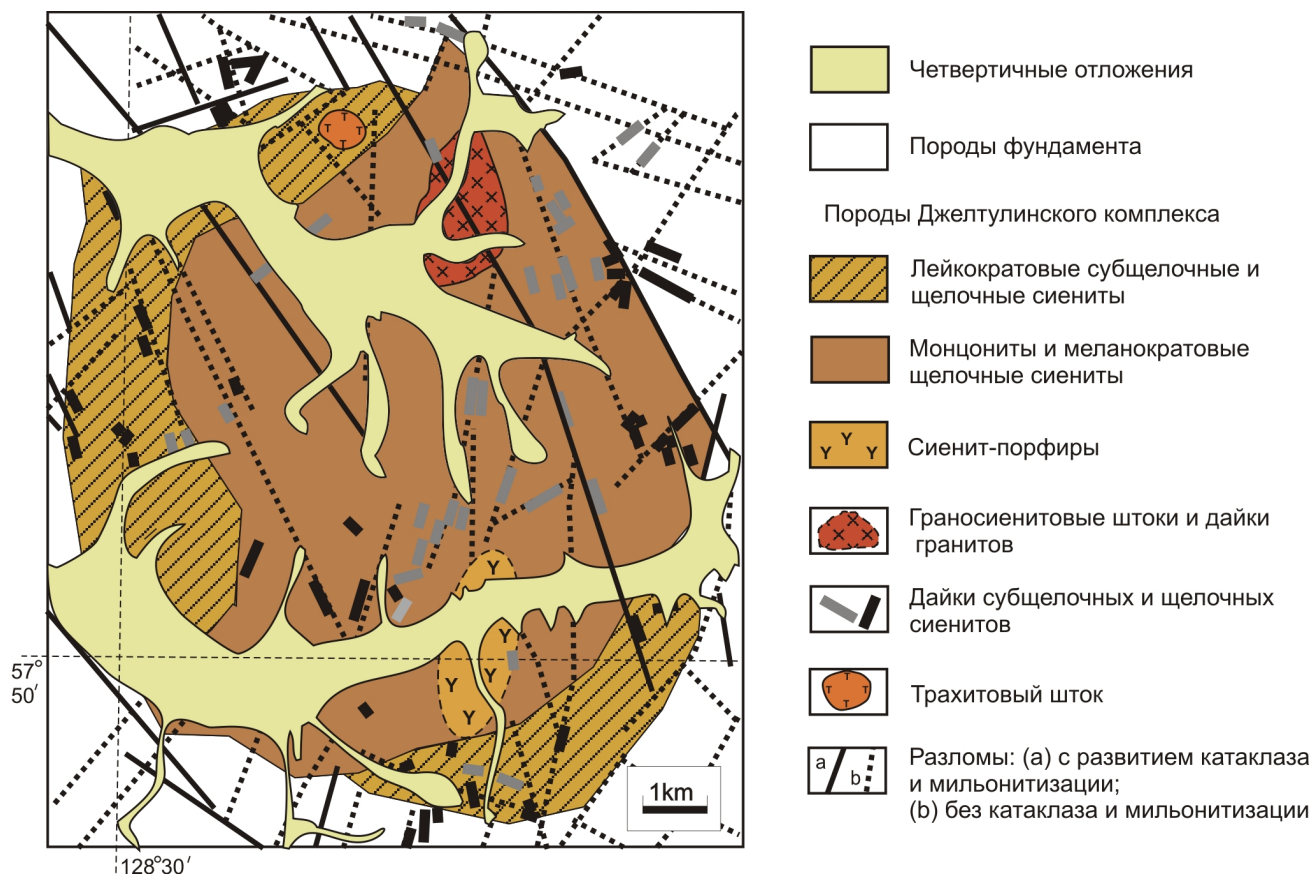


Рис. 2. Геологическое строение Джелтулинского массива
(по [Кравченко и др., 2014; Прокопьев и др., 2018])

Fig. 2. The geological structure of the Dzheltulinsky massif
(data [Kravchenko et al., 2014; Prokopyev et al., 2018])

В плане Амгинская сутурная зона имеет дугообразную форму и протягивается на 500 км с севера на юг при ширине порядка 150–200 км (см. рис. 1). Структурный план зоны определяется широким развитием надвиговых и сдвиговых структур, а также сопряженных с ними систем складок, ориентировка которых подчинена простиранию зоны [Парфенов, Кузьмин, 2001].

В строении Амгинской зоны участвуют архейские комплексы амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фаций метаморфизма, раннепротерозойские ортогнейсовые и парагнейсовые толщи субгранулитовой гранулитовой фации, а также фрагменты архейских и раннепротерозойских зеленокаменных поясов и дифференцированные плутоны ультраосновных и основных пород [Парфенов, Кузьмин, 2001].

Структурная позиция Верхнеамгинского золотосного района характеризуется многоярусным строением, определяющим три главных типа геоструктур региона: нижнедевонский фундамент, венд-нижнедевонский осадочный чехол и мезо-

зойские участки активизации (рис. 3). Архейские структуры фундамента с несогласием перекрыты венд-нижнедевонским платформенным чехлом морских глинисто-карбонатных осадков. На отдельных участках в северной части района, на вершинах водоразделов сохранились небольшие мощности мезозойских терригенных отложений юрской (юхтинская свита) и кайнозойской систем [Парфенов, Кузьмин, 2001].

Основной объем магматических образований связан с платформенным этапом мезозойской тектономагматической активности. Мезозойские изверженные породы на современном эрозионном срезе представлены крупным телом и множеством штоков сиенитов и сиенит-порфиров, а также примыкающими к нему с юга штоками монзонитов. Встречаются отдельные тела щелочных (эгириновых) гранитов (см. рис. 3). Дайковый комплекс представлен силлами, штоками и дайками лампрофиров (минетт). Дайки лампрофиров имеют преимущественно северо-западное и северо-восточное направление, соответствующее преобладающим направлениям тектонических разломов.

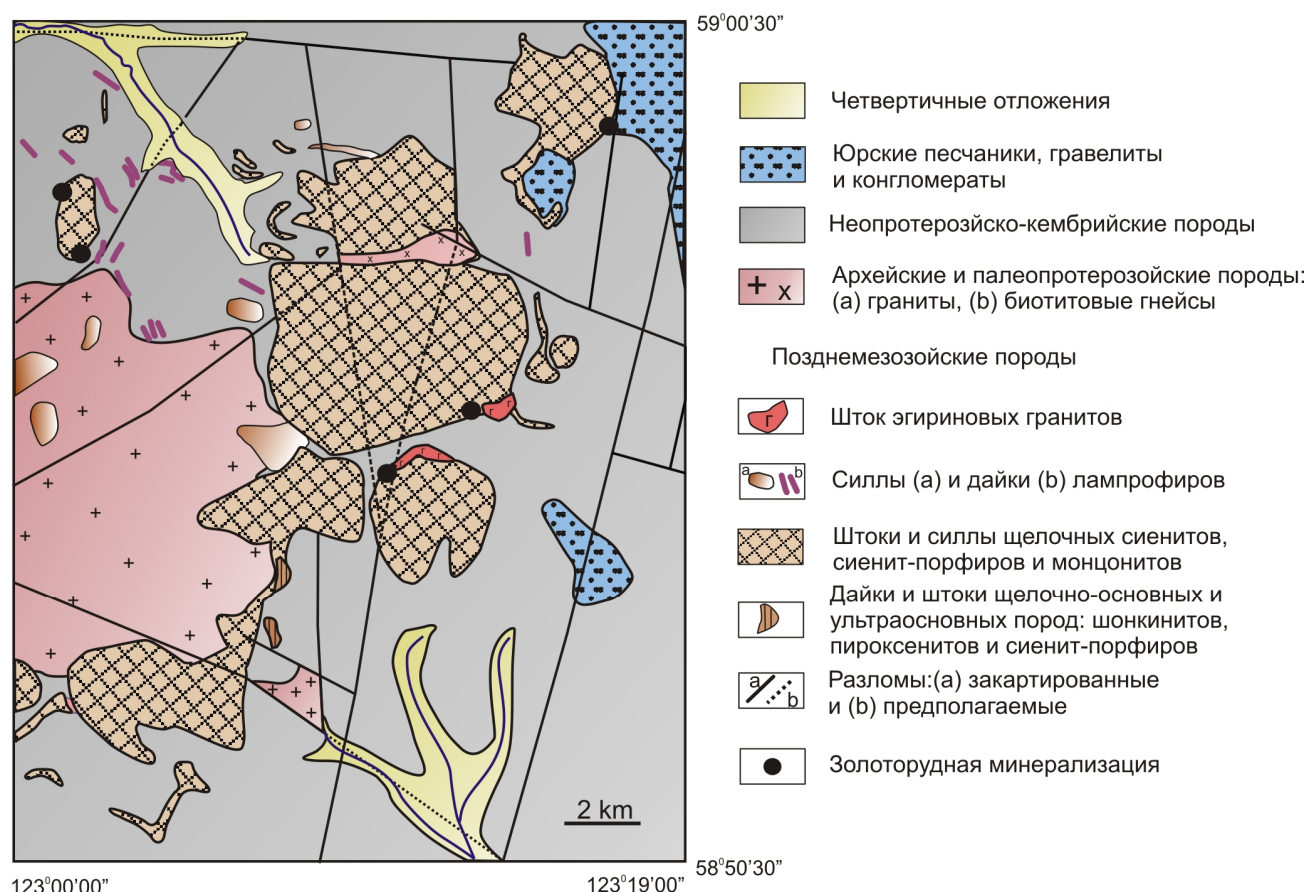


Рис. 3. Геологическая схема строения Верхнеамгинского массива
(данные [Prokopyev et al., 2019] с дополнениями авторов)

Fig. 3. Geological structure of the Verkhneamginsky massif
(data [Prokopyev et al., 2019] with additions of the authors)

Кроме того, в пределах Верхнеамгинской площади встречаются дайки и штоки щелочно-базитовых и ультраосновных пород: шонкиниты, пироксениты и сиенит-порфиры (см. рис. 3), отвечающие одним из ранних фаз становления мезозойского комплекса в пределах Верхнеамгинского массива (по геологическим данным).

Со щелочными интрузиями связаны зоны сульфидизации, окварцевания и скарнирования, сопровождаемые золоторудной минерализацией [Prokopyev et al., 2019]. Тектоническая характеристика района определяется разломами субмеридионально-северовосточного простирания, входящими в систему Амгинского глубинного разлома. Разломы северо-восточного и северо-западного простирания формируют диагональные разрывные структуры, наложенные на зону Амгинского глубинного разлома, или органически входят в его структуру, наследуя его тектонику. Заложенные в докембрийское время разломы этой системы неоднократно активизировались, особенно активно в мезозое, когда была сформирована блоковая структура района, интенсивно

проявлен магматизм и связанная с ним золоторудная гидротермальная деятельность [Парфенов, Кузьмин, 2001; Prokopyev et al., 2019].

Методика измерений

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование. Эксперименты по $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датированию проводились по мономинеральным фракциям, отбор которых производился вручную под бинокулярной лупой из фракции 0,3–0,1 мм измельченного образца. Облучение проб было проведено в кадмированном канале научного реактора ВВР-К типа в Научно-исследовательском институте ядерной физики (Томск). Градиент нейтронного потока за период облучения не превышал 0,5 % в размере образца. В качестве монитора использовался стандартный K/Ag образец мусковит МСА-11 (ОСО No 129–88), подготовленный Всесоюзным научно-исследовательским институтом минерального сырья Министерства геологии СССР (ВИМС) в 1988 г. Для его калибровки в качестве $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ монитора применялись международные стандартные

образцы мусковит Bern 4m и биотит LP-6 [Baksi et al., 1996]. По результатам калибровки в качестве возраста мусковита MCA-11 было принято среднее, которое составило $311,0 \pm 1,5$ млн лет [Травин, 2016]. Значение полной постоянной распада ^{40}K , в соответствии с [Steiger, Jager, 1977], принималось равным $5,543 \times 10^{-10}$ год $^{-1}$.

Холостой опыт по определению ^{40}Ar (10 мин при 1 200 °C) не превышал 5×10^{-10} нсм 3 . Очистку аргона производили с помощью Ti- и ZrAl-SAES-геттеров. Дополнительная очистка осуществлялась с помощью кварцевого аппендикса, погруженного в жидкий азот. Изотопный состав аргона измерялся на масс-спектрометре Noble gas 5400 фирмы «Микромасс» (Великобритания). Для коррекции на изотопы ^{36}Ar , ^{37}Ar , ^{40}Ar , полученные при облучении Ca, K, использованы следующие коэффициенты: $(^{39}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0,000891 \pm 0,000005$, $(^{36}\text{Ar}/^{37}\text{Ar})_{\text{Ca}} = 0,000446 \pm 0,000006$, $(^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar})_{\text{K}} = 0,089 \pm 0,001$. Особое внимание уделялось контролю фактора изотопной дискриминации с помощью измерения порции очищенного атмосферного аргона. Среднее значение отношения $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ на период измерений составило $295,5 \pm 0,5$. Нагревание образца происходило в кварцевом реакторе, помещенном в резистивную печь. Датирование производилось методом ступенчатого прогрева. Контроль температуры осуществлялся посредством хромель-алюмелевой термопары. Точность регулировки температуры составляла ± 1 °C.

U/Pb датирование. Определение возраста зерен циркона U/Pb методом было проведено в Центре многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН. Измерения проводились на масс-спектрометре высокого разрешения с индуктивно связанной плазмой Thermo Scientific Element XR (Германия), соединенном с системой лазерной абляции New Wave Research UP 213, на основе ультрафиолетового Nd:YAG лазера с длиной волны 213 нм. Параметры измерения масс-спектрометра оптимизировали для получения максимальной интенсивности сигналов Pb и U при минимальном значении $^{254}\text{UO}/^{238}\text{U}$ (менее 2 %), используя стандарт NIST SRM612. Все измерения выполняли по массам ^{202}Hg , $^{204}(\text{Pb} + \text{Hg})$, ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U . Съемка проводилась в режиме E-scan, детектирование сигналов – в режиме счета (counting) для всех изотопов, кроме ^{206}U , ^{238}U и ^{232}Th (режим triple). Диаметр лазерного луча составлял 30 мкм, частота повторения импульсов 5 Hz и плотность энергии лазерного излучения 3 Дж/см 2 . Данные масс-спектрометрических измерений обрабатывали с помощью программы Glitter [Griffin et al., 2008]. U-Pb изотопные отношения нормализовали на соответствующие значения изотопных отношений стандартного циркона Plesovice [Slama et al., 2008]. Для контроля качества использованы цирконовые стан-

дарты Temora [Black et al., 2004] и Harvard 91500 [Wiedenbeck et al., 1995], для которых получены конкордантные оценки возраста 414 ± 4 млн лет ($n = 14$) и 1062 ± 11 млн лет ($n = 10$) (2σ) соответственно. Данные для стандартов циркона совпадают с оценками возраста, полученными методом ID-TIMS. Диаграммы с конкордией построены с использованием программы Isoplot [Ludwig, 2003].

Петрография исследуемых пород

Верхнеамгинский массив. Согласно геологическому, петрографическому и минералогическому исследованию щелочных пород Верхнеамгинского массива, установлено, что основные фазы представлены штокообразными телами сиенитов и сиенит-порфиоров, а также дайками и пластовыми интрузиями лампрофиоров (минетт). Детальная вещественная характеристика основных фаз массива дана в работе [Prokoryev et al., 2019]. Далее приведена краткая петрографическая характеристика исследуемых геохронологическими методами образцов пород: интрузий минетт (обр. 7062, 9079) и щелочных сиенитов (Ам-45-18 и Ам-46-18) (рис. 3, 4).

Щелочные сиениты сложены калиевым полевым шпатом с мезопертитовыми вростками альбита и содержат порфировые вкрапленники альбита, калиевого полевого шпата, амфибола и биотита (флогопита). Полевые шпаты являются главными породообразующими минералами, на них приходится 45–75 % содержания породы. Для данной породы характерна порфировидная структура и массивная текстура. Индекс темноты – лейкократовая порода. Размеры вкрапленников достигают первых миллиметров. Второстепенными и акцессорными минералами (5–15 %) являются апатит, титанит, циркон и рудные минералы. Вторичные минералы представлены карбонатом, эпидотом и хлоритом. Лампрофиры представляют собой равномернозернистую полевошпатовую породу с рассеянной вкрапленностью (1–3 %) чешуек флогопита, зерен магнетита, кристаллов апатита, иногда порфировых вкрапленников оливина и клинопироксена, которые замещаются хлоритом и серицитом. В интерстициях между зерен полевого шпата отмечаются редкие зерна кварца. Структура породы – порфировидная, структура основной массы – равномернозернистая, ксеноморфная. Порода – лейкократовая. Размеры вкрапленников могут достигать первых миллиметров. Из второстепенных и акцессорных минералов (менее 1 %) диагностированы апатит, карбонат, титанит, альбит, циркон и рудные минералы.

Джелтулинский массив. Для геохронологических исследований джелтулинского массива были отобраны образцы сиенитов ДЖ 13-08-012, ДЖ 13-08-034 и ДЖ 13-08-80 (рис. 5), а также рудного метасоматита ДЖ 13-08-116. Далее приведена краткая петрографическая характеристика этих образцов.

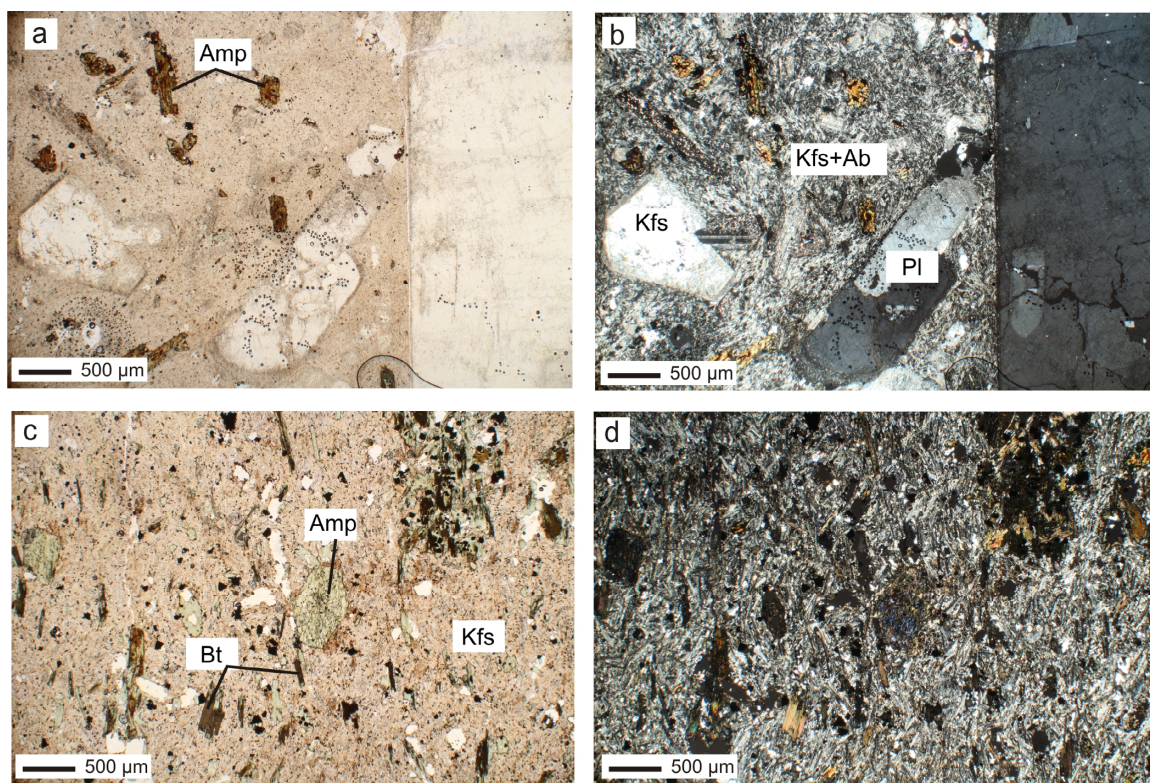


Рис. 4. Фотографии петрографических шлифов сиенит-порфира (a, b – николи скрещены) и лампрофиров (c, d – николи скрещены) Верхнеамгинского массива

Обозначения минералов: Amp – амфибол, Kfs – калишпат, Ab – альбит, Pl – плагиоклаз, Bt – биотит

Fig. 4. Photographs of petrographic sections of syenite-porphyr (a, b – nicols crossed) and lamprophyres (c, d – nicols crossed) of the Verkhneamginsky massif

Identification of minerals: Amp – amphibole, Kfs – potassium feldspar, Ab – albite, Pl – plagioclase, Bt – biotite

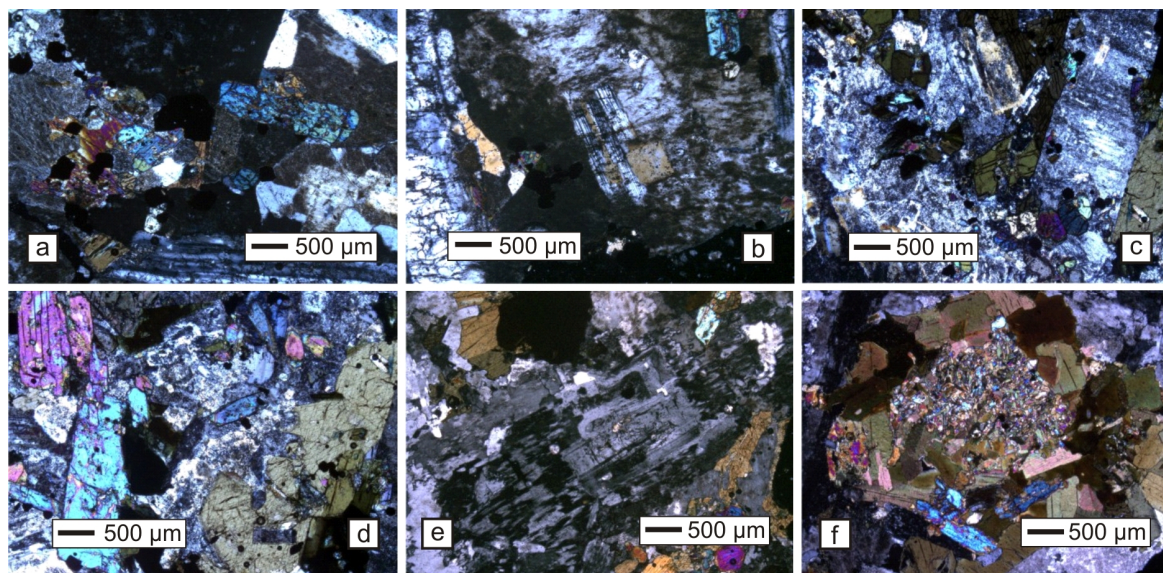


Рис. 5. Фотографии шлифов пород Джелтулинского массива

a – моноклинный пироксен в сиените ДЖ 13-08-012; b – включения плагиоклаза и цветных минералов в порфировых выделениях КПШ в сиените ДЖ 13-08-012; c – фрагмент порфировидной структуры сиенита ДЖ 13-08-034, порфировые выделения представлены крупными индивидами КПШ; d – удлиненно-призматические кристаллы пироксена и роговой обманки в сиените ДЖ 13-08-034; e – общая структура сиенита ДЖ 13-08-080; f – шлировые скопления цветных минералов в сиените ДЖ 13-08-080

Fig. 5. Photographs of thin sections of rocks of the Dzheltulinsky massif

a – Monoclinic pyroxene in syenite DZ 13-08-012; b – Inclusions of plagioclase and non-ferrous minerals in porphyry secretions of Kfs in syenite DZ 13-08-012; c – a fragment of the porphyry structure of syenite DZ 13-08-034, porphyry precipitates are represented by large individuals of the Cpy; d – elongated prismatic crystals of pyroxene and hornblende in syenite DZ 13-08-034; e – the general structure of syenite DZ 13-08-080; f – accumulations of colored minerals in syenite DZ 13-08-080

Сиенит ДЖ 13-08-012 полнокристаллический, меланократовый. Содержание калиевого полевого шпата (КПШ) – 75 %, плагиоклаза – 10 %, пироксена – 8 %, биотита – 2 %, роговой обманки – 5 %, рудных минералов – 3 %. КПШ пелитизирован, образует неправильные зерна, характерны простые двойники, наиболее крупные выделения калиевого полевого шпата несут включения плагиоклаза и цветных минералов (см. рис. 5, *b*). Плагиоклаз изменен вторичными процессами, сохранился лишь в качестве включений в КПШ. Моноклинный пироксен представлен в виде призматических, удлиненных, неправильной формы зерен с неровными очертаниями, плеохроизм от бледно-зеленого, бледно-желтого до зеленовато-синих, бледно-розоватых тонов. Пироксен частично изменен вторичными процессами и довольно часто замещен роговой обманкой (см. рис. 5, *a*). Роговая обманка представлена неправильными, реже короткопризматическими формами зерен с цветом плеохроизма от зеленого до бурого. Биотит присутствует в виде единичных зерен неправильной формы. Рудные минералы развиваются по темноцветным.

Состав сиенита ДЖ 13-08-034 представлен КПШ – 60 %, плагиоклазом – 15 %, биотитом – 10 %, пироксеном – 10 %, роговой обманкой – 3 %, рудным минералом – 2 %. Структура породы порфировидная, обусловленная крупными индивидами КПШ (см. рис. 5, *c*), основная масса состоит из гипидиоморфнозернистых кристаллов плагиоклаза и темноцветных минералов. Биотит преобладает среди темноцветных минералов, и равномерно распределен по всей породе в виде индивидуальных гипидиоморфных пластинок. Пироксен и роговая обманка образуют небольшие, неравномерно распределенные скопления, а также встречаются в виде индивидуальных зерен (см. рис. 4, *d*). Рудный минерал тяготеет к темноцветным минералам.

Сиенит ДЖ13-08-80 характеризуется гипидиоморфнозернистой структурой (см. рис. 5, *e*), полиминеральным составом. Минеральный состав представлен: КПШ – 70 %, плагиоклаз – 10 %, оливин – 4 %, пироксен – 5 %, биотит – 5 %, роговая обманка – 10 %, рудный минерал – 1 %. Порода сложена преимущественно удлиненными, призматическими с неправильными очертаниями, изометричными, зернами калиевого полевого шпата с пертитовым строением. Плагиоклаз представлен самостоятельными, прямоугольными, удлиненными формами кристаллов. Роговая обманка представлена короткими призмами с неправильной формы зернами. Моноклинные пироксены двух генераций. Первая представлена удлиненными, призматическими с неправильными очертаниями зернами, в сростках с роговой обманкой или замещающая последнюю. Вторая генерация образует шлировые скопления совместно с биотитом и

роговой обманкой (см. рис. 5, *f*). Оливин сохранился в виде зерен неправильной формы с характерной трещиноватостью. Биотит присутствует в двух генерациях. Первая генерация представлена более крупными самостоятельными пластинками биотита, образующими круговые скопления вместе с роговой обманкой вокруг шлировых скоплений более мелких цветных минералов. Вторая генерация биотита представлена тонкими чешуйками, которые образуют шлировые скопления, в ассоциации с очень мелкими пироксеном и роговой обманкой.

Результаты Ar-Ar датирования

Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования пород Джелтулинского массива. Возрастной спектр монофракции биотита из образца щелочного сиенита ДЖ 13-08-80 образует $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастной спектр, состоящий из шести ступеней (рис. 6, *b*; табл. 1). Четыре последние ступени соответствуют возрастному плато с возрастом $117,8 \pm 3,8$ млн лет (рис. 6, *b*). Общее количество газа среди ступеней, составляющих возрастное плато отвечает более 80 % от выделенного ^{39}Ar .

Амфибол из меланократовых сиенитов (обр. ДЖ 13-08-034, рис. 6, *a*; табл. 1) демонстрирует возрастной спектр, состоящий из девяти ступеней. Четыре последние ступени объединяются в возрастное плато, средневзвешенный возраст которого составляет $111 \pm 1,3$ млн лет (рис. 6, *a*). Плато включает 75 % ^{39}Ar выделенного в ходе измерений.

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастной спектр полевого шпата образца щелочных сиенитов (ДЖ 13-08-012) состоит из десяти ступеней (рис. 6, *c*; табл. 1). Семь ступеней образуют возрастное плато – возрасты всех ступеней совпадают в пределах погрешности 1σ [Fleck et al., 1977]. Средневзвешенный возраст плато равен $120,2 \pm 1,7$ млн лет. Плато включает около 75 % выделенного ^{39}Ar .

Валовая проба рудного метасоматита ДЖ 13-08-116 имеет $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастной спектр из девяти ступеней (рис. 6, *d*; табл. 1). Все ступени кроме первой могут быть включены в возрастное плато со средневзвешенным возрастом $121,4 \pm 2,3$ млн лет с содержанием ^{39}Ar более 90 % от общего количества (рис. 6, *d*).

Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования пород Верхнеамгинского массива. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ спектр полевого шпата дайки минетты (обр. 7062, см. рис. 7, *a*; табл. 2), состоит из десяти ступеней (рис. 7, *a*). Восемь средне- и высокотемпературных ступеней образуют возрастное плато и определяют средневзвешенный возраст исследуемого образца величиной $138,5 \pm 1,5$ млн лет (табл. 2). Количество выделенного ^{39}Ar в рамках возрастного плато составляет более 95 % от общего объема ^{39}Ar , выделившегося из образца в ходе эксперимента.

По полевому шпату из дайки минетты (обр. 9079, рис. 7, *b*; табл. 2) получен $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастной

спектр, состоящий из десяти ступеней (рис. 7, *b*). Восемь ступеней можно объединить в возрастное плато. Средневзвешенный возраст полученного возрастного плато составляет $133,4 \pm 2$ млн лет. Объем выделенного в рамках возрастного плато ^{39}Ar достигает 85 % (табл. 2). Полученный возраст соответствует возрасту закрытия $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ изотопной системы в полевом шпате образца и отвечает времени становления дайки минетты.

Результаты U-Pb датирования

Для определения U-Pb возраста пород Верхнеамгинского массива были отобраны цирконы из трубок взрыва АМ 45-18 и АМ 46-18. В основном цирконы

представлены в виде обломков размером 200–400 мкм. В катодолюминесцентных изображениях наблюдается магматическая зональность. Встречаются предположительно реликтовые ядра цирконов (см. рис. 8). U-Pb изотопные результаты и характер распределения тория, урана и величины Th/U приведены в табл. 3.

Экспериментально полученные результаты свидетельствуют о наличии трех кластеров возрастов: 1,9–2,1; 2,4–2,6 и 2,7–2,9 млрд лет соответственно (рис. 8, табл. 3). При этом примерно 70 % точек соответствует второй группе возрастов. Средневзвешенный возраст по этим группам результатов составляет $2\,466 \pm 24$ млн лет и $2\,449 \pm 21$ млн лет для образцов АМ 45-18 (рис. 8, *a*) и АМ 46-18 (рис. 8, *b*) соответственно.

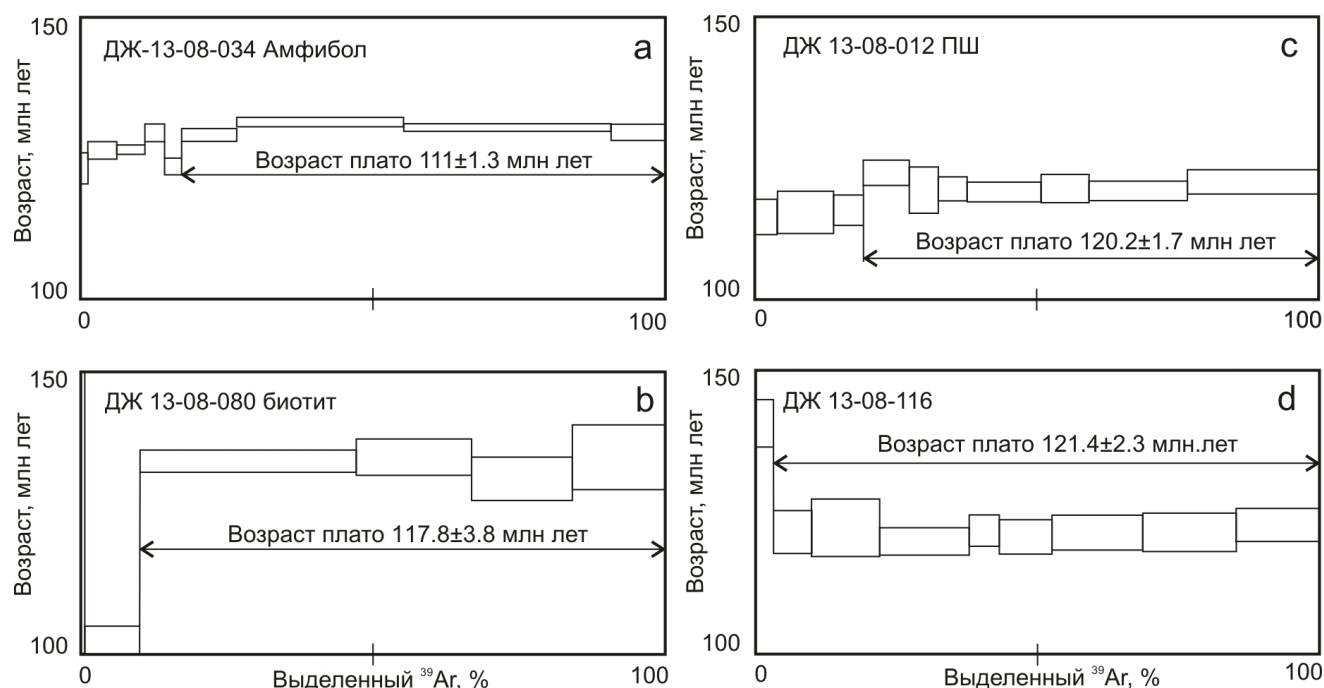


Рис. 6. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования пород Джелтулинского массива

a – возрастные спектры амфибола из образца сиенита ДЖ 13-08-034; *b* – биотита из образца сиенита ДЖ 13-08-080; *c* – полевого шпата из образца сиенита ДЖ 13-08-012; *d* – метасоматита ДЖ 13-08-116

Fig. 6. Results of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of rocks of the Dzheltulinsky massif.

a – Age spectra of amphibole from syenite sample DZ 13-08-034; *b* – biotite from syenite sample DZ 13-08-080; *c* – feldspar from syenite sample DZ 13-08-012; *d* – ore bearing metasomatic rock DZ 13-08-116

Таблица 1

Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования пород Джелтулинского массива

Table 1

Results of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of rocks of the Dzheltulinsky massif

T, °C	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	Выделенный ^{39}Ar , %	Возраст, млн лет	±
ДЖ 13-08-80 биотит; J = 0,004976 ± 0,000065											
500	115,7	12,4	0,1	0,1	0,8	0,6	0,3	0,1	0,7	112,8	265,9
850	19,2	0,2	0,033	0,008	0,07	0,03	0,06	0,01	10,1	9,3	31,0
970	18,47	0,03	0,015	0,001	0,011	0,008	0,016	0,001	47,2	118,3	3,8
1 025	18,19	0,05	0,016	0,003	0,01	0,01	0,015	0,003	67,0	119,7	6,6
1 100	19,30	0,06	0,021	0,002	0,01	0,01	0,022	0,003	84,1	112,2	7,6
1 170	19,08	0,09	0,018	0,003	0,03	0,01	0,018	0,005	100,0	119,8	11,5

T, °C	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	Выделенный ^{39}Ar , %	Возраст, млн лет	±
ДЖ 13-08-034 амфибол; J = 0,003948 ± 0,000041											
500	33,4	0,5	0,04	0,01	0,03	0,02	0,03	0,02	0,07	0,01	3,5
600	22,88	0,09	0,017	0,001	0,006	0,002	0,006	0,002	0,023	0,004	17,2
700	20,78	0,05	0,021	0,001	0,020	0,007	0,020	0,007	0,013	0,002	31,1
800	19,48	0,06	0,019	0,003	0,029	0,004	0,029	0,004	0,017	0,003	46,8
900	21,59	0,02	0,026	0,004	0,036	0,006	0,036	0,006	0,025	0,001	55,7
1 000	20,43	0,03	0,016	0,001	0,049	0,005	0,049	0,005	0,022	0,001	69,0
1 075	20,06	0,03	0,016	0,002	0,059	0,005	0,059	0,005	0,016	0,001	83,4
ДЖ 13-08-034 ПШ; J = 0,00511 ± 0,000068											
500	24,5	5,4	0,25	0,05	0,42	0,09	0,2	0,2	0,3	10	574,7
600	19,52	0,02	0,0167	0,0002	0,004	0,003	0,023	0,001	4,1	114,8	3,0
685	14,86	0,02	0,0177	0,0004	0,101	0,004	0,006	0,001	14,1	115,6	3,8
750	16,11	0,02	0,015	0,002	0,070	0,003	0,0105	0,0009	19,3	116,0	2,7
825	15,34	0,01	0,0169	0,0004	0,088	0,004	0,0053	0,0006	27,5	122,7	2,2
890	16,15	0,03	0,012	0,001	0,102	0,003	0,009	0,001	32,5	119,6	4,1
970	17,15	0,02	0,0138	0,0007	0,067	0,002	0,0125	0,0006	37,7	119,9	2,1
1 050	15,63	0,01	0,0150	0,0003	0,063	0,001	0,0076	0,0003	50,8	119,3	1,7
1 100	16,68	0,02	0,0172	0,0006	0,060	0,002	0,0109	0,0007	59,4	119,9	2,4
1 150	15,93	0,01	0,0162	0,0004	0,0486	0,0006	0,0086	0,0003	76,8	119,5	1,8
1 200	15,65	0,02	0,0161	0,0001	0,036	0,001	0,0070	0,0006	100,0	121,0	2,1
ДЖ 13-08-116; J = 0,005091 ± 0,000068											
500	87,4	2,3	0,04	0,03	0,3	0,1	0,18	0,03	0,2	285,5	61,7
600	22,80	0,04	0,0187	0,0009	0,012	0,007	0,023	0,002	3,2	140,9	4,2
680	16,16	0,03	0,0162	0,0007	0,007	0,004	0,008	0,001	10,0	121,7	3,8
750	14,88	0,03	0,0173	0,0005	0,003	0,003	0,004	0,002	22,2	122,4	5,1
800	14,27	0,01	0,0160	0,0004	0,001	0,001	0,0026	0,0007	38,0	120,0	2,4
850	15,19	0,03	0,0120	0,0009	0,0009	0,0009	0,0049	0,0009	43,3	122,0	2,8
925	14,65	0,02	0,0156	0,0002	0,0005	0,0005	0,004	0,001	52,7	120,9	3,1
1 000	14,22	0,02	0,0159	0,0002	0,0003	0,0003	0,002	0,001	68,8	121,6	3,1
1 075	14,34	0,02	0,0148	0,0002	0,0003	0,0003	0,002	0,001	85,4	121,7	3,4
1 175	14,48	0,02	0,0155	0,0001	0,002	0,002	0,002	0,001	100,0	123,0	2,9

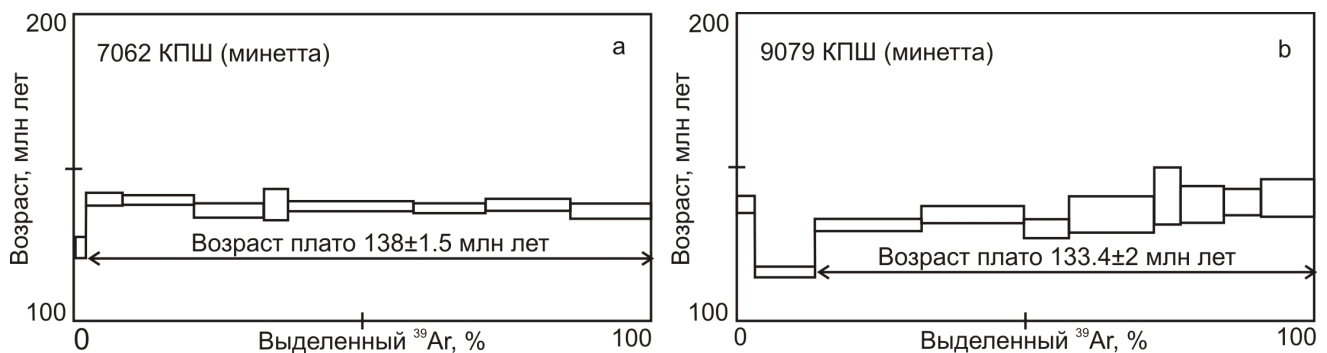


Рис. 7. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования пород Верхнеамгинского массива
Возрастные спектры КФС из образцов минет 7062 (a) и 9079 (b)

Fig. 7. Results of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of rocks of the Verkhneamginsky massif
Age spectra of Kfs from lamprophyre samples 7062 (a) and 9079 (b)

Таблица 2

Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования пород Верхнеамгинского массива

Table 2

Results of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of rocks of the Verkhneamginsky massif

T, °C	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	Выделенный ^{39}Ar , %	Возраст, млн лет	±
7 062 КФС J = 0,003684 ± 0,000036											
500	86,0	1,4	0,04	0,02	17,6	7,9	0,26	0,01	0,3	67,8	24,6
600	36,4	0,1	0,025	0,002	2,0	1,2	0,058	0,002	2,1	124,2	3,5
700	26,82	0,03	0,016	0,002	1,0	0,2	0,0168	0,0009	8,5	139,8	2,1
775	24,42	0,02	0,0150	0,0004	0,7	0,2	0,0087	0,0005	20,7	139,7	1,6
825	23,23	0,03	0,0177	0,0006	0,4	0,1	0,007	0,001	32,9	136,2	2,4

T, °C	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{38}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{37}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	$^{36}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$	±	Выделенный ^{39}Ar , %	Возраст, млн лет	±
875	25,02	0,07	0,0193	0,0003	0,1	0,1	0,012	0,003	37,1	138,1	5,1
950	22,83	0,02	0,0167	0,0001	0,11	0,08	0,0044	0,0004	58,8	137,7	1,5
1 000	23,25	0,01	0,0176	0,0008	0,3	0,2	0,0061	0,0005	71,3	137,1	1,6
1 065	23,89	0,02	0,0174	0,0004	0,2	0,1	0,0078	0,0008	86,0	138,0	2,0
1 130	24,35	0,03	0,0179	0,0006	0,2	0,2	0,010	0,001	100,0	136,2	2,5
9 079 КПШ J = 0,003515 ± 0,000032											
500	72,2	0,1	0,041	0,003	0,5	0,4	0,168	0,001	3,2	137,7	2,7
600	25,51	0,02	0,020	0,001	0,4	0,2	0,0223	0,0008	13,6	116,2	1,8
675	25,84	0,03	0,0162	0,0009	0,1	0,1	0,0147	0,0009	32,0	131,4	2,0
740	26,34	0,04	0,0176	0,0008	1,0	0,2	0,015	0,001	49,7	134,6	2,8
800	24,04	0,06	0,019	0,002	0,7	0,2	0,009	0,002	57,5	130,2	3,1
900	24,5	0,1	0,017	0,001	0,5	0,1	0,008	0,003	72,3	134,6	6,0
975	26,1	0,1	0,022	0,002	0,5	0,3	0,010	0,005	76,9	140,8	9,3
1 050	25,96	0,1	0,0158	0,0002	0,01	0,07	0,011	0,003	84,3	137,9	6,0
1 100	25,92	0,08	0,018	0,001	0,0	0,2	0,011	0,002	90,8	138,8	4,2
1 150	26,2	0,1	0,0184	0,0004	0,01	0,03	0,011	0,003	100,0	140,3	6,2

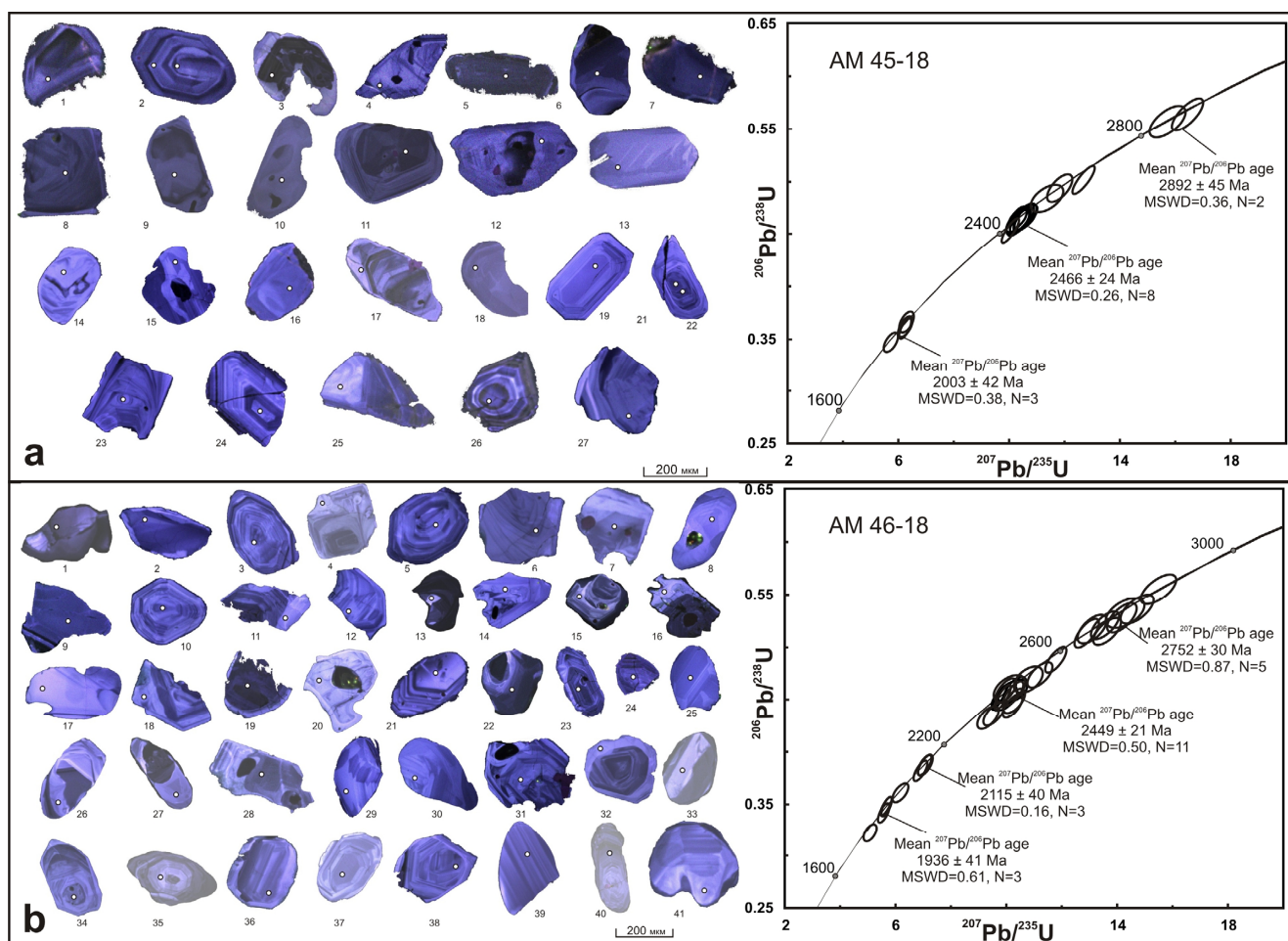


Рис. 8. Результаты U-Pb исследования цирконов из щелочных пород Верхнеамгинского массива AM 45-18 (a) и AM 46-18 (b)

Fig. 8. The results of the U-Pb investigations of zircons from alkaline rocks of the Verkhneamginsky massif AM 45-18 (a) and AM 46-18 (b)

Результаты U-Pb датирования пород Верхнеамгинского массива

Results of U-Pb dating of rocks of the Verkhneamginsky massif

№	Th/U	²⁰⁶ Pb, ppm	U, ppm	Изотопные отношения						Возраст, млн лет									
				Pb ²⁰⁷ / Pb ²⁰⁶	1σ	Pb ²⁰⁷ / U ²³⁵	1σ	Pb ²⁰⁶ / U ²³⁸	1σ	Pb ²⁰⁸ / Th ²³²	1σ	Pb ²⁰⁷ / Pb ²⁰⁶	1σ	Pb ²⁰⁷ / U ²³⁵	1σ	Pb ²⁰⁶ / U ²³⁸	1σ	Pb ²⁰⁸ / Th ²³²	1σ
1	0,70	328	796	0,15665	0,00309	9,85322	0,2011	0,45297	0,00759	0,15081	0,00256	2 420	33	2 421	19	2 409	34	2 839	45
5	1,07	69	140	0,19488	0,00392	14,69975	0,39444	0,53688	0,00907	0,14855	0,00259	2 784	33	2 796	26	2 770	38	2 799	46
9	1,02	132	415	0,12068	0,00244	5,64852	0,12715	0,34821	0,00584	0,09369	0,00164	1 966	36	1 924	19	1 926	28	1 810	30
10	1,14	74	144	0,2072	0,00421	15,45234	0,43002	0,55577	0,0094	0,14886	0,00266	2 884	36	2 844	27	2 849	39	2 805	47
11	0,79	28	67	0,16216	0,0035	10,09813	0,37078	0,4611	0,00796	0,13236	0,00262	2 478	36	2 444	34	2 444	35	2 513	47
12	0,94	64	147	0,16156	0,00341	10,77276	0,34818	0,47007	0,00801	0,13281	0,00252	2 472	35	2 504	30	2 484	35	2 521	45
13	0,22	104	290	0,13135	0,0027	7,06219	0,17182	0,38831	0,00653	0,11347	0,00228	2 116	36	2 119	22	2 115	30	2 172	41
14	1,44	86	213	0,15823	0,00327	9,55176	0,24631	0,43655	0,00735	0,12073	0,0022	2 437	35	2 393	24	2 335	33	2 304	40
15	0,73	28	94	0,1124	0,00246	5,05317	0,15273	0,32338	0,00551	0,09502	0,00187	1 839	39	1 828	26	1 806	27	1 835	35
17	0,52	67	136	0,19116	0,00407	14,25565	0,46747	0,53307	0,00907	0,16644	0,00342	2 752	35	2 767	31	2 754	38	3 112	59
20	0,89	36	85	0,15782	0,00341	9,92605	0,30769	0,45245	0,00768	0,12837	0,00259	2 433	36	2 428	29	2 406	34	2 441	46
21	1,21	103	233	0,1838	0,00363	12,89758	0,29478	0,51373	0,00873	0,14859	0,00253	2 688	32	2 672	22	2 673	37	2 800	45
22	0,57	325	1 064	0,11823	0,00232	5,66053	0,10837	0,34897	0,00589	0,10364	0,00175	1 930	35	1 925	17	1 930	28	1 993	32
25	0,51	80	172	0,19445	0,00387	14,16719	0,35715	0,52844	0,00896	0,1474	0,00263	2 780	32	2 761	24	2 735	38	2 779	46
26	0,21	133	376	0,13019	0,00258	7,04295	0,14757	0,38736	0,0065	0,11012	0,00198	2 101	34	2 117	19	2 111	30	2 112	36
27	0,85	67	215	0,11704	0,00238	5,55987	0,13469	0,34212	0,00577	0,09899	0,00172	1 912	36	1 910	21	1 897	28	1 908	32
28	0,96	84	201	0,16013	0,00321	9,97226	0,24549	0,45884	0,00772	0,12598	0,00217	2 457	33	2 432	23	2 434	34	2 398	39
29	1,13	63	134	0,18791	0,00379	13,09341	0,3574	0,51749	0,00873	0,13984	0,00243	2 724	33	2 686	26	2 689	37	2 646	43
30	0,60	32	95	0,12257	0,00259	6,1709	0,18548	0,36098	0,00613	0,10233	0,00194	1 994	37	2 000	26	1 987	29	1 969	36
31	1,14	82	199	0,16162	0,0033	9,32856	0,25252	0,43313	0,00727	0,11792	0,00206	2 473	34	2 371	25	2 320	33	2 253	37
32	1,00	95	217	0,16142	0,00327	10,2971	0,26654	0,46115	0,0077	0,13026	0,00226	2 471	34	2 462	24	2 445	34	2 475	40
33	0,11	711	1 627	0,15574	0,00306	9,71782	0,18136	0,45289	0,00747	0,13052	0,00226	2 410	33	2 408	17	2 408	33	2 480	40
34	1,30	73	158	0,16367	0,00332	11,19789	0,29836	0,47455	0,00791	0,13873	0,0024	2 494	34	2 540	25	2 504	35	2 626	43
35	0,27	211	572	0,13224	0,00266	6,88253	0,15305	0,3828	0,00633	0,1445	0,00271	2 128	35	2 096	20	2 089	30	2 728	48
37	1,35	136	298	0,16041	0,00323	10,21105	0,23297	0,45668	0,00751	0,12872	0,00221	2 460	34	2 454	21	2 425	33	2 447	40
38	1,02	89	198	0,16088	0,00326	10,21284	0,24164	0,44501	0,00732	0,13476	0,00234	2 465	34	2 454	22	2 373	33	2 555	42
39	0,50	95	180	0,18724	0,0038	13,54506	0,34516	0,52146	0,00858	0,16198	0,00294	2 718	33	2 718	24	2 705	36	3 034	51
40	0,48	174	350	0,17383	0,0035	11,77483	0,25603	0,48837	0,00798	0,15422	0,00271	2 595	33	2 587	20	2 564	35	2 899	47
41	0,45	166	315	0,18208	0,00369	13,62277	0,32676	0,51554	0,00844	0,1589	0,00286	2 672	33	2 724	23	2 680	36	2 981	50
42	0,68	43	91	0,15651	0,00335	10,21261	0,34676	0,45877	0,00766	0,15773	0,00302	2 418	36	2 454	31	2 434	34	2 960	53
43	0,85	91	194	0,15979	0,00328	10,27655	0,25479	0,44943	0,00735	0,13293	0,00237	2 453	34	2 460	23	2 393	33	2 523	42

Обсуждение результатов

Мезозойский магматизм. Полученные $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом возраста внедрения даек лампрофиров согласуются с ранее опубликованными датировками мезозойского магматизма Верхнеамгинского массива. Кристаллизация сиенитов и поздних даек лампрофиров происходила $131,4 \pm 1,5$ млн лет ($131,4 \pm 2,9$ млн лет, U-Pb метод [Prokoryev et al., 2019]) и $117,7 \pm 3,4$ млн лет назад соответственно [Пономарчук и др., 2019], а ранний этап внедрения даек лампрофиров имел место в интервале $134,9 \pm 1,6$ – $132,3 \pm 1,5$ млн лет [Prokoryev et al., 2019]. Исследуемый в работе образец дайки минетты 7062 показывает чуть более древний возраст внедрения – $138,5 \pm 1,5$ млн лет, что расширяет диапазон щелочного магматизма до интервала $138,5 \pm 1,5$ – $117,7 \pm 3,4$ млн лет.

В результате проведенных исследований получен возраст формирования меланократовых сиенитов (ДЖ 13-08-012 и ДЖ 13-08-80) – $120,2 \pm 1,7$ млн лет (по полевоому шпату) и $117,8 \pm 3,8$ млн лет (по биотиту), соответственно. Так же получен возраст внедрения дайки меланократовых сиенитов (ДЖ 13-08-034) – $111 \pm 1,3$ млн лет (по амфиболу). Возраст образования рудного метасоматита (ДЖ 13-08-116) составил $121,4 \pm 2,3$ млн лет.

Полученные возрасты кристаллизации щелочных сиенитов совпадают с ранее опубликованными датировками [Прокопьев и др., 2018] – возраст лейкократовых сиенит-порфиров (пуласкинов) составляет $121,1 \pm 1,3$ млн лет, а дайки лаурвикитов и пуласкинов внедрились в массив в интервале $120,1 \pm 2$ – $118,3 \pm 2,1$ млн лет. При этом полученный возраст дайки меланократовых сиенитов (ДЖ 13-08-034) – $111 \pm 1,3$ млн лет, что несколько моложе возраста трахитов – $115,5 \pm 1,6$ млн лет [Прокопьев и др., 2018] и расширяет интервал мезозойского магматизма от 121 до 111 млн лет.

Установленные временные рамки магматизма Верхнеамгинского массива близки по времени с позднемезозойскими магматическими процессами, широко проявленными в других районах Алданского Станового щита. Особое место среди щелочных областей Алдана отводится Центрально-Алданскому району, с одной стороны, в силу его особого экономического потенциала, а с другой – в силу его наибольшей изученности. Рябиновый щелочной массив считается эталонным объектом, на котором проявлены все фазы мезозойского щелочного магматизма [Кочетков и др., 1989; Максимов, 2003]. Данные Ar-Ar датирования ортоклаза из щелочного сиенита массива установили возраст формирования пород – $144,8 \pm 1,5$ млн лет [Borisenko et al., 2011]. Дайки лампрофиров Рябинового массива датируются интервалом 129–125 млн лет [Borisenko et al., 2011]. В пределах Лебединого рудного поля лампро-

фиры имеют близкий возраст – $132,4 \pm 1,6$ млн лет ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ по флогопиту [Borisenko et al., 2011]). U-Pb и Rb-Sr изотопные системы подтверждают (раннемеловой-позднеюрский) возраст кристаллизации сиенитов и лампрофиров Рябинового массива – 147–120 млн лет [Шатов и др., 2012; Шатова и др., 2017].

Щелочные породы массива Инагли (Центрально-Алданский район) сформировались в несколько этапов: кристаллизация оторочки дунитового ядра – клинопироксенитов, датируется возрастом $145,8 \pm 3,2$ млн лет; и образование дифференцированного щелочного кольца массива происходило в интервале 133–128 млн лет [Ибрагимова и др., 2015; Пономарчук и др., 2019]. Возраст образования флогопитовой вкрапленности в дунитах составляет $136,5 \pm 5,3$ млн лет (по флогопиту), а возраст формирования рудных жил (по амфиболу из полевошпат-хромдиопсид-слюданой жилы) равен $133,4 \pm 1$ млн лет [Пономарчук и др., 2019].

В результате исследований массива Ыллымах (Центрально-Алданский район) выделено три эпизода внедрения магм – 140, 130 и 125 млн лет, соответствующие трем группам пород – фельдшпатоидным и щелочные сиенитам, сиенитам от нефелина до кварцсодержащих и эгириновые щелочно-полевошпатовым гранитам [Васюкова и др., 2020].

Полученный возраст оруденения Желтулинского массива – $121,4 \pm 2,3$ млн лет – совпадает со становлением ранних фаз – лейкократовыми сиенитами и сиенит-порфирами. Мезозойский магматизм Желтулинского массива, как и связанное с ним золотое оруденение, моложе по сравнению с магматизмом Центрально-Алданского рудного узла. Эволюция рудообразующих систем Центрально-Алданского района охватывает интервал 138–130 млн лет. Основные рудопродуктивные стадии на месторождениях Рябиновое, Куранах и Лебединое, по данным Ar-Ag датирования, попадают в достаточно узкий диапазон времени ~ 137 млн лет, что предполагает их синхронное проявление в различных участках Центрально-Алданского щелочного комплекса. U-Pb возраст цирконов околорудных гумбеитов Рябинового массива составляет 125–133 млн лет [Шатова и др., 2017]. По данным U-Pb датирования, магматическая и гидротермально-метасоматическая деятельность в пределах Эльконского золото-уранового рудного узла отвечает диапазону 143–125 млн лет. Золото-урановые руды эльконского горста имеют возраст 130–125 млн лет [Казанский, 2004].

Докембрийская магматическая активность. U-Pb (SIMS/LA-ICP MS) анализ цирконов из образцов трубок взрыва (Ам 45-18 и Ам 46-18) показал наличие в каждом двух кластеров возрастов – 2,6–2,4 и 2,0–1,8 млрд лет. Подобные возрастные рубежи неоднократно встречались в цирконах мезозойских щелочных пород Алданского щита и являются отра-

жением длительной и многоэтапной эволюции. Например, в щелочных сиенитах Верхнеамгинского массива, вместе с цирконами, соответствующим возрасту кристаллизации пород – 131 млн лет, обнаружены цирконы возрастом 2,5–2,2 и 1,9–1,87 млрд лет [Prokoryev et al., 2019]. Возрасты цирконов 2,6 и 1,9 млрд лет отмечены для сиенитов и лампрофиров Рябинового массива Центрально-Алданского района [Шатов и др., 2012]. Цирконы в кварцевом монцодиорит-порфире щелочного обрамления массива Инагли Центрально-Алданского района, также, помимо мезозойского возраста кристаллизации, обнаруживают группы докембрийских возрастов – 1888 ± 31 и 2380 ± 33 млн лет [Ибрагимова и др., 2015]. Возраст же ядер цирконов кварцевого сиенит-порфира того же массива имеет конкордатные значения 1 924 и 1 920, $2\,566 \pm 48$ млн лет.

В строении центральной части Алдано-Станового щита архейские и раннепротерозойские гранитоиды имеют исключительно широкое время кристаллизации: становление интрузий гранитоидов нелюкского комплекса произошло в интервале $2\,398 \pm 4$ – $2\,522 \pm 2$ млн лет (U-Pb метод по циркону [Котов и др., 2004]). Ортогнейсы тимптонского комплекса имеют возраст $2\,011 \pm 2$ млн лет (U-Pb метод по циркону [Котов и др., 1995]). Для метаандезитов Балаганского зеленокаменного пояса и федоровской толщи U-Pb методом по циркону получена оценка возраста $2\,006 \pm 3$ млн лет [Великославинский и др., 2003, 2006]). Порфиробластические биотит-амфиболовые гнейсограниты Амгинской зоны тектонического меланжа имеют возраст $2\,423 \pm 43$ млн лет (U-Pb метод по циркону [Сальникова и др., 1993]), а возраст лейкосом мигматитов составляет 1895 ± 14 млн лет (U-Pb метод по циркону [Nutman et al., 1992]). Внедрение магнезиокарбонатитов Селигдарского месторождения датируется возрастом $1\,880 \pm 13$ млн лет (U-Pb метод по циркону [Prokoryev et al., 2017]). Изучение геохимии магнезиокарбонатитов Селигдара (Центральный Алдан) показало, что породы образовались из обогащенного мантийный источника, отделенного от деплетированной мантии на рубеже

2,5–2,7 млрд л. н. [Doroskevich et al., 2018]. Подобный тренд эволюции (ϵNd) отмечается для протерозойского Чинейского расслоенного массива и позднеархейских лампроитов Хани [Doroskevich et al., 2018; Vladykin et al., 2005]. На основании исследований геохимических характеристик массивов Центрального Алдана (Рябиновый, Томмотский, Якокутский и Инаглинский) предложена модель двухстадийной эволюции калиевых пород – докембрийская стадия формирования источников калиевых расплавов, с возможным участием субдуцированного компонента, и поднемозойская стадия, в ходе которой был широко проявлен щелочной магматизм, обусловленный благоприятным геодинамическим режимом, при этом влияние на состав пород источника было незначительным [Кононова и др., 1995].

Заключение

Таким образом, диапазон мезозойского щелочного магматизма Амгинской зоны тектонического меланжа 139–117 млн лет близок ко времени становления основных фаз Центрально-Алданского щелочного комплекса 145–125 млн лет.

Становление Желтулинского массива Тыркандинской зоны тектонического меланжа происходило в интервале 121–111 млн лет, что моложе времени образования центрально-алданских и верхнеамгинских щелочных пород.

Обнаруженные в щелочных сиенитах Верхнеамгинского массива цирконы демонстрируют значения возрастов, совпадающих с региональными эпизодами внутриплитного магматизма Алдано-Станового щита, и вкпе с изотопными данными могут свидетельствовать о возможном существовании древнего мантийного источника и его эволюции.

Петрографические и геохронологические исследования выполнены за счет гранта РНФ № 19-17-00019. Геология района изучена в рамках государственного задания по проектам № 0330–2016–0013, 0330–2016–0002.

ЛИТЕРАТУРА

- Билибин Ю.А. Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1958. Т. 1. 432 с.
- Богатиков О.А., Махоткин И.Л., Кононова В.А. Лампроиты и их место в систематике высокомагнезиальных калиевых пород // Известия АН СССР. Сер. геол. 1985. № 12. С. 3–10.
- Бойцов В.Е., Пилипенко Г.Н. Золото и уран в мезозойских гидротермальных месторождениях Центрального Алдана (Россия) // Геология рудных месторождений. 1998. Т. 40, № 4. С. 354–369.
- Васюкова Е.А., Пономарчук А.В., Дорошкевич А.Г. Петролого-геохимическая характеристика пород Ыллымахского массива (Алданский щит, Южная Якутия) // Геология и геофизика. 2020. № 4. С. 489–507.
- Великославинский С.Д., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Глебовицкий В.А., Ковач В.П., Загорная Н.Ю., Беляевский Н.А., Яковлева С.З., Федосеенко А.М. U-Pb возраст федоровской толщи алданского гранулитогнейсового мегакомплекса (Алданский щит) // Доклады Академии наук. 2003. Т. 393, № 1. С. 91–96.
- Великославинский С.Д., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Ковач В.П., Глебовицкий В.А., Загорная Н.Ю., Яковлева С.З., Толмачева Е.В., Анисимова И.В., Федосеенко А.М. Первичная природа, возраст и геодинамическая обстановка формирования протолитов метаморфических пород федоровской толщи, Алданский щит // Петрология. 2006. Т. 14, № 1. С. 25–43.
- Великославинский С.Д., Котов А.Б., Толмачева Е.В., Сальникова Е.Б., Ковач В.П., Ларин А.М. Раннедокембрийские гранитогнейсовые комплексы центральной части Алданского щита // Петрология. 2011. Т. 19, № 4. С. 399–416.

- Ветлужских В.Г.** Золотое оруденение эпохи мезозойской тектоно-магматической активизации Алдано-Становой провинции : дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Якутск, 1990. 325 с.
- Ветлужских В.Г., Казанский В.И., Кочетков А.Я., Яновский В.М.** Золоторудные месторождения Центрального Алдана // Геология рудных месторождений. 2002. Т. 44, № 6. С. 467–499.
- Владыкин Н.В.** Геохимия и генезис лампроитов Алданского щита // Геология и геофизика. 1997. Т. 38, № 1. С. 123–135.
- Дворник Г.П.** Серицит-микроклиновые метасоматиты и золотое оруденение Рябиновского рудного поля (Алданский щит) // Литосфера. 2009. № 2. С. 56–66.
- Дзевановский Ю.К., Ворона И.Д., Лагздина Г.Ю.** Геологическая карта южной части Якутской АССР. Л., 1972.
- Ибрагимова Э.К., Радьков А.В., Молчанов А.В., Шатова Н.В., Шатов В.В., Лепехина Е.Н., Антонов А.В., Толмачева Е.В., Соловьев О.Л., Терехов А.В., Хорохорина Е.И.** Результаты U-Pb (SHRIMP II) датирования цирконов из дунитов массива Инагли (Алданский щит) и проблема генезиса концентрически-зональных комплексов // Региональная геология и металлогения. 2015. № 62. С. 64–78.
- Казанский В.И.** Уникальный Центрально-Алданский золото-урановый рудный район (Россия) // Геология рудных месторождений. 2004. Т. 46, № 3. С. 195–211.
- Кононова В.А., Первов В.А., Богатиков О.А., Мюс-Шумахер У., Келлер Й.** Мезозойский калиевый магматизм Центрального Алдана: геодинамика и генезис // Геотектоника. 1995. № 3. С. 35–46.
- Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Богомолова Л.М., Смелов А.П.** О возрастных границах формирования ранних надвиговых структур Восточной части Олекминской гранит-зеленокаменной области Алданского щита // Доклады РАН. 1995. Т. 342, № 2. С. 209–212.
- Котов А.Б., Глебовицкий В.А., Казанский В.И., Сальникова Е.Б., Перцев Н.Н., Ковач В.П., Яковлева С.З.** Возрастные границы формирования главных картируемых структурных элементов центральной части Алданского щита // Доклады Академии Наук. 2005. Т. 405, № 8. С. 1155–1158.
- Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Глебовицкий В.А., Ковач В.П., Ларин А.М., Великославинский С.Д., Загорная Н.Ю.** Sm-Nd изотопные провинции Алданского щита // Доклады Академии наук. 2006. Т. 410, № 1. С. 91–94.
- Котов А.Б., Сквитина Т.М., Ковач В.П., Великославинский С.Д., Лопатин Д.В., Скляров Е.В., Толмачева Е.В., Бобровская О.В.** Новые данные о возрасте континентальной коры западной части Алданского щита: результаты изотопно-геохимических Sm-Nd исследований кайнозойских песчаных отложений Чарской и Токкинской впадин // Доклады Академии Наук. 2017. Т. 475, № 3. С. 291–294.
- Кочетков А.Я., Пахомов В.Н., Попов А.Б.** Магматизм и метасоматизм Рябиновского рудоносного щелочного массива (Центральный Алдан). Магматизм медно-молибденовых рудных узлов. Новосибирск : Наука, 1989. С. 79–110.
- Кочетков А.Я.** Мезозойские золотоносные рудно-магматические системы Центрального Алдана // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 7. С. 850–864.
- Кравченко А.А., Иванов А.И., Прокопьев И.Р., Зайцев А.И., Бикбаева Е.Е.** Особенности состава и возраст формирования мезозойских интрузий Тыркандинского рудного района Алдано-Станового щита // Отечественная геология. 2014. № 5. С. 43–52.
- Ларин А.М., Котов А.Б., Великославинский С.Д., Сальникова Е.Б., Ковач В.П.** Раннедокембрийские гранитоиды А-типа Алданского щита и его складчатого обрамления: источники и геодинамические обстановки формирования // Петрология. 2012. Т. 20, № 3. С. 242–265.
- Максимов Е.П.** Мезозойские рудоносные магматогенные системы Алдано-Станового щита : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Якутск, 2003.
- Максимов Е.П., Уютов В.И., Никитин В.М.** Центрально-Алданская золото-урановорудная магматогенная система (Алдано-Становой щит, Россия) // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 29, № 2. С. 3–26.
- Мельников А.И., Смелов А.П., Имаев В.С., Тимофеев В.Ф., Кравченко А.А.** Внутреннее строение Тыркандинской shear зоны (Якутия) // Материалы международной конференции «Геолого-геофизическая среда и разнообразные проявления сейсмичности». Нерюнгри : Изд-во Техн. ин-та (ф) СВФУ, 2015. С. 48–55.
- Панина Л.И.** Низкотитанистые лампроиты Алдана (Сибирь): результаты изучения расплавных включений в минералах // Геология и геофизика. 1997. Т. 38, № 1. С. 112–122.
- Парфенов Л.М., Кузьмин М.И.** Тектоника, геодинамика и металлогения Республики Саха (Якутия). М. : МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 571 с.
- Пономарчук А.В., Прокопьев И.Р., Светлицкая Т.В., Дорошкевич А.Г.** $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ геохронология щелочных пород массива Инагли (Алданский щит, Южная Якутия) // Геология и геофизика. 2019. Т. 60, № 1. С. 41–54.
- Пономарчук А.В., Прокопьев И.Р., Дорошкевич А.Г., Егитова И.В., Кравченко А.А., Иванов А.И.** $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраст щелочных пород Верхнеамгинского массива (Алданский щит, Южная Якутия) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 3. С. 28–39.
- Прокопьев И.Р., Кравченко А.А., Иванов А.И., Борисенко А.С., Пономарчук А.В., Зайцев А.И., Кардаш Е.А., Рожков А.А.** Геохронология и рудоносность Джелтулинского щелочного массива (Алданский щит, Южная Якутия) // Тихоокеанская геология. 2018. Т. 37, № 1. С. 38–51.
- Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Неичин А.А., Яковлева С.З., Морозова Й.М., Богомолова Л.М., Смелов А.П.** О возрасте Тунгурчаканского массива (Олекминская гранит-зеленокаменная область, Алданский щит) // Доклады РАН. 1993. Т. 331, № 3. С. 356–358.
- Травин А.В.** Термохронология субдукционно-коллизийных, коллизийных событий Центральной Азии : автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Новосибирск, 2016.
- Шатов В.В., Молчанов А.В., Шатова Н.В., Сергеев С.А., Белова В.Н., Терехов А.В., Радьков А.В., Соловьев О.Л.** Петрография, геохимия и изотопное датирование (U-Pb и Rb-Sr) щелочных магматических пород Рябинового массива (Южная Якутия) // Региональная геология и металлогения. 2012. № 51. С. 62–78.
- Шатова Н.В., Скублов С.Г., Мельник А.Е., Шатов В.В., Молчанов А.В., Терехов А.В., Сергеев С.А.** Геохронология щелочных магматических пород и метасоматитов Рябинового массива (Южная Якутия) на основе изотопно-геохимического (U-Pb, REE) исследования циркона // Региональная геология и металлогения. 2017. № 69. С. 33–48.

Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Иванов В.Г. Внутриплитная позднемезозойско-кайнозойская вулканическая провинция Центрально-Восточной Азии — проекция горячего поля мантии // Геотектоника. 1995. № 5. С. 41–67.

Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Кузьмин М.И. Северо-Азиатский суперплум в фанерозое: магматизм и глубинная геодинамика // Геотектоника. 2000. № 5. С. 3–29.

Baksi A.K., Archibald D.A., Farrar E. Intercalibration of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating standards // Chem. Geol. 1996. V. 129. P. 307–324.

Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., Davis D.W., Aleinikoff J.N., Valley J.W., Mundil R., Campbell I.H., Korsch R.J., Williams I.S., Foudoulis C. Improved Pb-206/U-218 microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element-related matrix effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards // Chemical Geology. 2004. V. 205. P. 115–140.

Bogatikov O.A., Kononova V.A., Pervov V.A., Zhuravlev D.Z. Petrogenesis of Mesozoic Potassic Magmatism of the Central Aldan: a Sr-Nd isotopic and geodynamic model // Int. Geol. Rev. 1994. V. 36, № 7. P. 629–644.

Borisenko A.S., Gas'kov I.N., Dashkevich E.G., Okrugin A.M., Ponomarchuk A.V., Travin A.V. Geochronology of magmatic processes and ore-formation in the Central Aldan gold-ore region // Intern. Symp. Large Igneous Provinces of Asia. Irkutsk, 2011. P. 38–39.

Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R., Izokh A.E., Klemm R., Ponomarchuk A.V., Nikolaeva I.V., Vladyskin N.V. Isotopic and trace element geochemistry of the Seligdar magnesiocarbonatites (South Yakutia, Russia): Insights regarding the mantle evolution beneath the Aldan-Stanovoy shield // J. Asian Earth Sci. 2018. V. 154. P. 354–368.

Fleck R.J., Sutter J.F., Elliot D.H. Interpretation of discordant $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age-spectra of Mesozoic tholeiites from Antarctica // Geoch. Cosm. Acta. 1977. V. 41. P. 15–32.

Frost B.R., Avchenko O.V., Chamberlain K.R., Frost C.D. Evidence for extensive Proterozoic remobilization of the Aldan shield and implications for Proterozoic plate tectonic reconstructions of Siberia and Laurentia // Precambrian research. 1998. V. 89. P. 1–23.

Goryachev N.A., Pirajno F. Gold deposits and gold metallogeny of Far East Russia // Ore Geol. Rev. 2014. V. 59. P. 123–151.

Griffin W.L., Powell W.J., Pearson N.J., O'Reilly S.Y. GLITTER: Data reduction software for laser ablation ICP-MS, in Sylvester, P. (ed.), Laser Ablation ICP-MS in the Earth Sciences: Current practices and outstanding issues: Mineralogical Association of Canada. 2008. Short Course Series. V. 40. P. 307–311.

Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M. A geodynamic perspective of worldclass gold deposits in East Asia. Gondwana Res. 2014. V. 26, № 3–4. P. 816–833.

Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M. Geodynamics of Late Mesozoic PGE, Au, and U mineralization in the Aldan Shield, North Asian Craton // Ore Geol. Rev. 2015 V. 68. P. 30–42.

Ludwig K. User's Manual for Isoplot 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley : Berkeley Geochronology Center. 2003. V. 4. P. 1–70.

Mitchell R.H., Smith C.B., Vladyskin N.V. Isotopic composition of strontium and neodymium in potassic rocks of the Little Murun complex, Aldan Shield, Siberia // Lithos. 1994. V. 32. P. 243–248.

Müller D., Groves D.I. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization, fifth edition. Mineral resource reviews. Springer, 2019. 398 p.

Nutman A.P., Chernyshev I.V., Baadsgaard H., Smelov A.P. The Aldan shield of Siberia, USSR: The age of its Archean components and evidence for widespread reworking in the Mid-Proterozoic // Precamb. Res. 1992. V. 54, № 4. P. 195–209.

Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Ponomarchuk A.V., Sergeev, S.A. Mineralogy, age and genesis of apatite-dolomite ores at the Seligdar apatite deposit (Central Aldan, Russia) // Ore Geol. Rev. 2017. V. 81. P. 296–308.

Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Ponomarchuk A.V., Redina A.A., Yegitova I.V., Ponomareva J.D., Sergeev S.A., Kravchenko A.A., Ivanov A.I., Sokolov E.P., Kardash E.A., Minakov A.V. U-Pb SIMS and Ar-Ar geochronology, petrography, mineralogy and gold mineralization of the late Mesozoic Amga alkaline rocks (Aldan shield, Russia) // Ore Geology Reviews. 2019. V. 109. P. 520–534.

Rosen O.M., Serenko V.P., Spetsius Z.V., Manakov A.V., Zinchuk N.N. Yakutian Kimberlite Province: position in the structure of the Siberian craton and composition of the upper and lower crust // Russian Geology and Geophysics. 2002. V. 43. P. 1–24.

Slama J., Kosler J., Condon D.J., Crowley J.L., Gerdes A., Hanchar J.M., Horstwood M.S.A., Morris G.A., Nasdala L., Norberg N., Schaltegger U., Schoene N., Tubrett M.N., Whitehouse M.J. Plesovice zircon – a new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis // Chemical Geology. 2008. V. 249, № 1–2. P. 1–35.

Steiger R.H., Jäger E. Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology // Earth Planet. Sci. Letters. 1977. V. 36. P. 359–361.

Vladyskin N.V., Morikyo T., Miuzaki T. Geochemistry of Sr and Nd isotopes in the carbonatites of Siberia and Mongolia and some geodynamic implications. In: Vladyskin, N.V. (Ed.), Deep-seated Magmatism, Its Sources and Their Relation to Plume Processes. Glazkovskaya printing House, Irkutsk, 2005. P. 89–107.

Wiedenbeck M., Alle P., Corfu F., Griffin W.L., Meier M., Oberli F., Von Quadt A., Roddick J.C., Spiegel W. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. Geostandards Newslett. 1995. V. 19. P. 1–23.

Авторы:

Пономарчук Антон Викторович, младший научный сотрудник, лаборатория изотопно-аналитической геохимии, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: antponomar@gmail.com

Прокопьев Илья Романович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра геологии рудных месторождений, Геолого-геофизический факультет, Новосибирский государственный университет; научный сотрудник, лаборатория щелочного магматизма и оруденения, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: prokop@igm.nsc.ru

Дорошкевич Анна Геннадьевна, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, заведующая лабораторией щелочного магматизма и оруденения, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: anna-dor@yandex.ru

Семенова Дина Валерьевна, научный сотрудник, лаборатория изотопно-аналитической геохимии, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия.

E-mail: sediva@igm.nsc.ru

Кравченко Александр Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры региональной геологии и геоинформатики, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, исполняющий обязанности заведующего лабораторией металлогении Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия.

E-mail: freshrock@yandex.ru

Иванов Алексей Иванович кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, лаборатория геодинамики и региональной геологии, Институт Геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия.

E-mail: Leps_2002@mail.ru

Geosphere Research, 2020, 4, 6–24. DOI: 10.17223/25421379/17/1

A.V. Ponomarchuk¹, I.R. Prokopyev^{1,2}, A.G. Doroshkevich¹, D.V. Semenova¹, A.A. Kravchenko^{3,4}, A.I. Ivanov³

¹*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia*

²*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia*

³*Diamond and Precious Metal Geology Institute of the SB RAS, Yakutsk, Russia*

⁴*North-Eastern Federal University of M.K. Ammosov, Yakutsk, Russia*

GEOCHRONOLOGY OF THE MESOZOIC ALKALINE MAGMATISM OF TYRKANDA AND AMGA TECTONIC ZONES (ALDAN SHIELD): NEW U-Pb AND Ar-Ar DATA

The territory of the Aldan-Stanovoi Shield is a large industrial region in which gold mining objects have been associated with the manifestation of late Mesozoic alkaline magmatism. Ore-bearing alkaline magmatism on the Aldan shield occurs in the age range of 160–115 Ma and is represented by a wide range of high-potassium rocks: alkaline syenites and syenite-porphyrries, monzonites, leucitic and nepheline syenites, lamprophyres, biotite pyroxenites and shononites, as well as alkaline and and granitoids. Five superterrains are distinguished in the structure of the Aldan-Stanovoi shield: the West Aldan superterrane, the Central Aldan composite terrane, the East Aldan composite terrane and Uchursky, as well as the Tyndinsky and Chogarsky superterrains. The composite terranes of the Aldan-Stanovoi shield, in turn, are divided by zones of tectonic melange: Amga, Kalarskaya and Tyrkanda.

In this work, we studied petrography, Ar-Ar, and U-Pb geochronology of Mesozoic alkaline magmatism of the Tyrkanda and Amga tectonic zones using the example of the Dzheltulinsky and Verkhneamginsky massifs, respectively. The formation of the Dzheltulinsky massif of the Tyrkanda zone of tectonic melange occurred in the range of 121–111 Ma. The obtained mineralization age of the Dzheltulinsky massif – 121.4 ± 2.3 Ma – coincides with the formation of the early phases – leucocratic syenites and syenite-porphyry.

The range of Mesozoic alkaline magmatism of the Amga zone of tectonic melange of 139–117 Ma is specified. The experimentally obtained age-specific U-Pb zircons from the alkaline rocks of the Verkhneamginsky massif indicate the presence of three age clusters: 1.9–2.1 billion years, 2.4–2.6 billion years, and 2.7–2.9 billion years. Moreover, approximately 70% of the points correspond to the second group of ages. These age intervals coincide with regional episodes of intraplate magmatism of the Aldan-Stanovoi shield, and may indicate the possible evolution of an ancient mantle source.

Keywords: Aldan shield, Ar-Ar dating, dating of alkaline rocks, Mesozoic magmatism, dating of gold deposits.

References

- Bilibin Y.A. *Izbrannyye trudy* [Selected Works]. V. 1. Moscow: AN SSSR publ., 1958. 432 p. In Russian.
- Bogatikov O.A., Mahotkin I.L., Kononova V.A. *Lamproity i ikh mesto v sistematike vysokomagnez'nykh kaliyevykh porod* [Lamproites and their place in the systematics of highly magnesian potassium rocks] // *Izv. AN SSSR. Ser. geol.* 1985. No 12. pp. 3–10. In Russian.
- Boytsov V.Y., Pilipenko G.N. *Zoloto i uran v mezozoyskikh gidrotermal'nykh mestorozhdeniyakh Tsentral'nogo Aldana (Rossiya)* [Gold and uranium in the Mesozoic hydrothermal deposits of Central Aldan (Russia)] // *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy.* 1998. V. 40. No 4. pp. 354–369. In Russian.
- Vasyukova E.A., Ponomarchuk A.V., Doroshkevich A.G. Petrological and geochemical characteristics of the rocks of the Ylymakh massif (Aldan shield, South Yakutia) // *Russian Geology and Geophysics.* 2020. No 4. pp. 489–507.
- Velikoslavinsky S.D., Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Glebovitsky V.A., Kovach V.P., Zagornaya N.Yu., Belyaevsky N.A., Yakovleva S.Z., Fedoseenko A. M. U-Pb age of the Fedorov sequence of the Aldan granulite-gneiss megacomplex (Aldan shield) // *Doklady Earth Sciences.* 2003. V. 393. No 8. pp. 1151–1155.
- Velikoslavinsky S.D., Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Kovach V.P., Glebovitsky V.A., Zagornaya N.Yu., Yakovleva S.Z., Tolmacheva E.V., Anisimova I.V., Fedoseenko A.M. Protoliths of the metamorphic rocks of Fedorov complex, Aldan shield: character, age, and geodynamic environments of origin // *Petrology.* 2006. V. 14. No 1. pp. 21–38.
- Velikoslavinskii S.D., Kotov A.B., Tolmacheva E.V., Sal'nikova E.B., Kovach V.P., Larin A.M. Early Precambrian granite-gneiss complexes in the Central Aldan Shield // *Petrology.* 2011. V. 19. No 4. 382–398.
- Vetluzhskikh V.G. *Zolotoye orudeneniye epokhi mezozoyskoy tektono-magmaticheskoy aktivizatsii Aldano-Stanovoy provintsii* [Gold ores of Mesozoic tectono-magmatic activation of Aldan-Stanovoy region]. PhD thesis. Yakutsk, 1990, 325p. In Russian.
- Vetluzhskikh V.G., Kazanskii V.I., Kochetkov A.Y., Yanovskii V.M. Central Aldan gold deposits // *Geol. Ore Deposits.* 2002. V. 44. No 6. pp. 405–434.
- Vladykin N.V. Geochemistry and genesis of lamproites of the Aldan shield // *Russian Geology and Geophysics.* 1997. V. 38. No 1. pp. 123–135.
- Dvornik, G.P. *Seritsit-mikroklinovyye metasomatity i zolotoye orudeneniye Ryabinovskogo rudnogo polya (Aldanskiy shchit)* [Sericite-microcline metasomatites and gold mineralization of the Ryabinovsky ore field (Aldan Shield)] // *Litosfera.* 2009. No 2. pp. 56–66. In Russian.

- Dzevanovskiy Y.K., Vorona I.D., Lagzdina G.Y. *Geologicheskaya karta yuzhnoy chasti Yakutskoy ASSR* [Geological map of South part of Yakutskaya ASSR]. Leningradskaya kartfabrika, 1972. In Russian.
- Ibragimova E.K., Rad'kov A.V., Molchanov A.V., Shatova N.V., Shatov V.V., Lepekhina Y.N., Antonov A.V., Tolmacheva Y.V., Solov'yev O.L., Terekhov A.V., Khorokhorina Y.I. *Rezultaty U-Pb (SHRIMP II) datirovaniya tsirkonov iz dunitov massiva Inagli (Aldanskiy shchit) i problema genezis kontsentricheski-zonal'nykh kompleksov* [Results of U-Pb (SHRIMP II) dating of zircons from dunites of the Inagli massif (Aldan shield) and the problem of the genesis of concentric-zonal complexes] // *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. 2015. No 62. pp. 64–78. In Russian.
- Kazansky V.I. The unique Central Aldan gold-uranium ore district (Russia) // *Geol. Ore Deposits*. 2004. V. 46. No 3. pp. 167–181.
- Kononova V.A., Pervov V.A., Bogatkov O.A., Myus-Shumakher U., Keller Y. *Mezozoyevskiy kaliyevyy magmatizm Tsentral'nogo Aldana: geodinamika i genezis* [Mesozoic potassium magmatism of Central Aldan: geodynamics and genesis] // *Geotektonika*. 1995. No 3. pp. 35–46. In Russian.
- Kotov A.B., Salnikova E.B., Bogomolova L.M., Smelov A.P. On the age limits of early thrust structures in the Olekma greenstone terrain, Aldan shield // *Doklady Earth Sciences*. 1995. V. 342. No 2. pp. 209–212.
- Kotov A.B., Glebovitsky V.A., Kazansky V.I., Sal'nikova E.B., Pertsev N.N., Kovach V.P., Yakovleva S.Z. Age boundaries of the formation of major structures in the Central Aldan shield // *Doklady Earth Sciences*. 2005. V. 405. No 8. pp. 1155–1158.
- Kotov A.B., Sal'nikova E.B., Glebovitsky V.A., Kovach V.P., Larin A.M., Velikoslavinsky S.D., Zagornaya N.Y. Sm-Nd isotopic provinces of the Aldan shield // *Doklady Earth Sciences*. 2006. V. 410. No 7. pp. 1066–1069.
- Kotov A.B., Skovitina T.M., Kovach V.P., Velikoslavinsky S.D., Lopatin D.V., Sklyarov E.V., Tolmacheva E.V., Bobrovskaya O.V. New data on continental crust age in the Western part of Aldan shield: results of Sm-Nd Isotopic study of cenozoic sand deposits in the Charskaya and Tokkinskaya basins // *Doklady Earth Sciences*. 2017. V. 475. No 3. pp. 291–294.
- Kochetkov A.Y., Pakhomov V.N., Popov A.B. *Magmatizm i metasomatizm Ryabinovskogo rudonosnogo shchelochnogo massiva (Tsentral'nyy Aldan). Magmatizm medno-molibdenovykh rudnykh uzlov*. [Magmatism and metasomatism of the Ryabinovsky ore-bearing alkaline massif (Central Aldan). Magmatism of copper-molybdenum ore nodes]. Novosibirsk: Nauka. Sibirskoye otdeleniye, 1989. pp. 79–110. In Russian.
- Kochetkov A.Y. Mesozoic gold-bearing ore-magmatic systems of Central Aldan // *Russian Geology and Geophysics*. 2006. V. 47. No 7. pp. 850–867.
- Kravchenko A.A., Ivanov A.I., Prokopyev, I.R., Zaitsev A.I., Bikbaeva E.E. *Osobennosti sostava i vozrast formirovaniya mezozoyevskikh intruziy Tyrkandinskogo rudnogo rayona Aldano-Stanovogo shchita* [Features of composition and age of formation of Mesozoic intrusions of the Tyrkandinsky ore district of the Aldan-Stanovoi shield] // *Otechestvennaya Geol.* 2014. No 5. pp. 43–52. In Russian.
- Larin A.M., Kotov A.B., Velikoslavinsky S.D., Salnikova E.B., Kovach V.P. Early Precambrian A-type granitoids of the Aldan shield and its folded frame: sources and geodynamic conditions of formation // *Petrology*. 2012. V. 20. No 3. pp. 242–265.
- Maximov E.P. *Mezozoyevskie rudonosnye magmatogennyye sistemy Aldano-Stanovogo shchita* [Mesozoic ore-bearing igneous systems of the Aldan-Stanovoy shield]. PhD thesis. Yakutsk, 2003. 385p. In Russian.
- Maximov E.P., Uytov V.I., Nikitin V.M. The Central Aldan Gold-uranium ore magmatogenic system, Aldan-Stanovoy Shield. Russia // *Russ. J. Pac. Geol.* 2010. V. 4. No 2. pp. 95–115.
- Melnikov A.I., Smelov A.P., Imaev V.S., Timofeev V.F., Kravchenko A.A. *Vnutrenneye stroeniye Tyrkandinskoy shear zony (Yakutiya)* [Internal structure of the Tyrkandinsky shear zone (Yakutia)] // *Materials of the Intern. conf. "Geological and geophysical environment and various manifestations of seismicity."* Neryungri: publishing house of Tech. institute, 2015. pp. 48–55. In Russian.
- Panina L.I. Low-titanium lamproites of Aldan (Siberia): results of a melt inclusions study // *Russian Geology and Geophysics*. 1997. V. 38. No 1. pp. 112–122.
- Parfenov L.M., Kuzmin M.I. *Tektonika, geodinamika i metallogeniya Respubliki Sakha (Yakutiya)* [Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Territory of the Republic of Sakha (Yakutia)]. Moscow. Nauka / Interperiodika, 2001. 571p. In Russian.
- Ponomarchuk A.V., Prokopyev I.R., Svetlitskaya T.V., Doroshkevich A.G. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of alkaline rock of Inagli massif (Aldan shield, South Yakutia) // *Russian Geology and Geophysics*. 2019. V. 60. No 1. pp. 41–54.
- Ponomarchuk A.V., Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Yegitova I.V., Kravchenko A.A., Ivanov A.I. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of alkaline rocks of the Upper Amga massif (Aldan shield, South Yakutia) // *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019. V. 330. No 3. pp. 28–39.
- Prokopyev I.R., Kravchenko A.A., Ivanov A.I., Borisenko A.S., Ponomarchuk A.V., Zaitsev A.I., Kardash E.A., Rozhkov A.A. Geochronology and ore mineralization of the Dzhetula alkaline massif (Aldan Shield, South Yakutia) // *Russ. J. Pac. Geol.* 2018. V. 12. No 1. pp. 34–45.
- Sal'nikova E.B., Kotov A.B., Neichin A.A., Yakovleva S.Z., Morozova J.M., Bogomolova L.M., Smelov A.P. *O vozraste Tungurchakanskogo massiva (Olekminskaya granit-zelenokamennaya oblast', Aldanskiy shchit)* [About the age of the Tungurchakan massif (Olekminskaya granite-greenstone region, Aldan shield)] // *Dokl. RAN*. 1993. V. 331. No 3. pp. 356–358. In Russian.
- Travin A.V. *Termhronologiya subduksionno-kollizionnykh, kollizionnykh sobitii Centralnoi Azii* [Thermochronology of subduction-collision, collision events of Central Asia]. Diss. Abstract. Novosibirsk, 2016. In Russian.
- Shatov V.V., Molchanov A.V., Shatova N.V., Sergeev S.A., Belova V.N., Terekhov A.V., Radkov A.V. *Petrografiya, geokhimiya i izotopnoye datirovaniye (U-Pb i Rb-Sr) shchelochnykh magmaticheskikh porod Ryabinovogo massiva (Yuzhnaya Yakutiya)* [Petrography, geochemistry and isotopic dating (U-Pb and Rb-Sr) alkaline magmatic rocks of Ryabinoviy massif (South Yakutia)] // *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. 2012. No 51. pp. 62–78. In Russian.
- Shatova N.V., Skublov S.G., Mel'nik A.Ye., Shatov V.V., Molchanov A.V., Terekhov A.V., Sergeyev S.A. *Geokhronologiya shchelochnykh magmaticheskikh porod i metasomatitov Ryabinovogo massiva (Yuzhnaya Yakutiya) na osnove izotopno-geokhimiicheskogo (U-Pb, REE) issledovaniya tsirokna* [Geochronology of alkaline igneous rocks and metasomatites of the Mountain ash massif (South Yakutia) based on isotope-geochemical (U-Pb, REE) studies of zircon] // *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. 2017. No 69. pp. 33–48. In Russian.
- Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Ivanov V.G. *Vnutriplitnaya pozdnemezozoyevskaya-kaynozoyevskaya vulkanicheskaya provintsiya Tsentral'no-Vostochnoy Azii – proyektziya goryachego polya manti* [Intraplate Late Mesozoic-Cenozoic volcanic province of Central-East Asia – projection of a hot mantle field] // *Geotektonika*. 1995. No 5. pp. 41–67. In Russian.
- Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Kuz'min M.I. *Severo-Aziatskiy superplyum v fanerozoeye: magmatizm i glubinnaya geodinamika* [North-Asian superplume in Phanerozoic: magmatism and deep geodynamics] // *Geotektonika*. 2000. No 5. pp. 3–29. In Russian.
- Baksi A.K., Archibald D.A., Farrar E. Intercalibration of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating standards // *Chem. Geol.* 1996. V. 129. pp. 307–324.

- Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., Davis D.W., Aleinikoff J.N., Valley J.W., Mundil R., Campbell I.H., Korsch R.J., Williams I.S., Foudoulis C. Improved Pb-206/U-218 microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element-related matrix effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards // *Chemical Geology*. 2004. V. 205. pp. 115–140.
- Bogatikov O.A., Kononova V.A., Pervov V.A., Zhuravlev D.Z. Petrogenesis of Mesozoic Potassic Magmatism of the Central Aldan: a Sr-Nd isotopic and geodynamic model // *Int. Geol. Rev.* 1994. V. 36. No 7. pp. 629–644.
- Borisenko A. S., Gas'kov I. N., Dashkevich E. G., Okrugin A.M., Ponomarchuk A.V., Travin A.V. Geochronology of magmatic processes and ore-formation in the Central Aldan gold-ore region // *Intern. Symp. Large Igneous Provinces of Asia*. Irkutsk, 2011. pp. 38–39.
- Doroshkevich A.G., Prokopyev I.R., Izokh A.E., Klemd R., Ponomarchuk A.V., Nikolaeva I.V., Vladykin N.V. Isotopic and trace element geochemistry of the Seligdar magnesiocarbonatites (South Yakutia, Russia): Insights regarding the mantle evolution beneath the Aldan-Stanovoy shield // *J. Asian Earth Sci.* 2018. V. 154. pp. 354–368.
- Fleck R.J., Sutter J.F., Elliot D.H. Interpretation of discordant $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age-spectra of Mesozoic tholeiites from Antarctica // *Geoch. Cosm. Acta*. 1977. V. 41. pp. 15–32.
- Frost B.R., Avchenko O.V., Chamberlain K.R., Frost C.D. Evidence for extensive Proterozoic remobilization of the Aldan shield and implications for Proterozoic plate tectonic reconstructions of Siberia and Laurentia // *Precambrian research*. 1998. V. 89. pp. 1–23.
- Goryachev N.A., Pirajno F., Gold deposits and gold metallogeny of Far East Russia // *Ore Geol. Rev.* 2014. V. 59. pp. 123–151.
- Griffin W.L., Powell W.J., Pearson N.J., O'Reilly S.Y. GLITTER: Data reduction software for laser ablation ICP-MS, in Sylvester, P. (ed.), *Laser Ablation ICP-MS in the Earth Sciences: Current practices and outstanding issues*: Mineralogical Association of Canada. 2008. Short Course Series. V. 40. pp. 307–311.
- Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M. A geodynamic perspective of worldclass gold deposits in East Asia. *Gondwana Res.* 2014. V. 26. No 3–4. pp. 816–833.
- Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M. Geodynamics of Late Mesozoic PGE, Au, and U mineralization in the Aldan Shield, North Asian Craton // *Ore Geol. Rev.* 2015. V. 68. pp. 30–42.
- Ludwig K. User's Manual for Isoplot 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. V. 4, Berkeley Geochronology Center. Berkeley, 2003. pp. 1–70.
- Mitchell R.H., Smith C.B., Vladykin N.V. Isotopic composition of strontium and neodymium in potassic rocks of the Little Murun complex, Aldan Shield, Siberia // *Lithos*. 1994. V. 32. pp. 243–248.
- Müller D., Groves D.I. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization, fifth edition. Mineral resource reviews. Springer, 2019. 398 p.
- Nutman A.P., Chernyshev I.V., Baadsgaard H., Smelov A.P. The Aldan shield of Siberia, USSR: The age of its Archean components and evidence for widespread reworking in the Mid-Proterozoic // *Precamb. Res.* 1992. V. 54. No 4. pp. 195–209.
- Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Ponomarchuk A.V., Sergeev, S.A. Mineralogy, age and genesis of apatite-dolomite ores at the Seligdar apatite deposit (Central Aldan, Russia) // *Ore Geol. Rev.* 2017. V. 81. pp. 296–308.
- Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Ponomarchuk A.V., Redina A.A., Yegitova I.V., Ponomareva J.D., Sergeev S.A., Kravchenko A.A., Ivanov A.I., Sokolov E.P., Kardash E.A., Minakov A.V. U-Pb SIMS and Ar-Ar geochronology, petrography, mineralogy and gold mineralization of the late Mesozoic Amga alkaline rocks (Aldan shield, Russia) // *Ore Geology Reviews* V. 109. 2019. pp. 520–534.
- Rosen O.M., Serenko V.P., Spetsius Z.V., Manakov A.V., Zinchuk N.N. Yakutian Kimberlite Province: position in the structure of the Siberian craton and composition of the upper and lower crust // *Russian Geology and Geophysics*. 2002. V. 43. pp. 1–24.
- Slama J., Kosler J., Condon D.J., Crowley J.L., Gerdes A., Hanchar J.M., Horstwood M.S.A., Morris G.A., Nasdala L., Norberg N., Schaltegger U., Schoene N., Tubrett M.N., Whitehouse M.J. Plesovice zircon - a new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis // *Chemical Geology*. 2008. V. 249. No 1–2. pp. 1–35.
- Steiger R.H., Jäger E. Subcommittee on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochemistry // *Earth Planet. Sci. Letters*. 1977. V. 36. pp. 359–361.
- Vladykin N.V., Morikyo T., Miuzaki T. Geochemistry of Sr and Nd isotopes in the carbonatites of Siberia and Mongolia and some geodynamic implications. In: Vladykin, N.V. (Ed.), *Deep-seated Magmatism, Its Sources and Their Relation to Plume Processes*. Glazkovskaya printing House, Irkutsk, 2005. pp. 89–107.
- Wiedenbeck M., Alle P., Corfu F., Griffin W.L., Meier M., Oberli F., Von Quadt A., Roddick J.C., Spiegel W. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses // *Geostandards Newslett.* 1995. V. 19. pp. 1–23.

Author's:

Ponomarchuk Anton V., Junior Researcher, Laboratory of isotope-analytical geochemistry, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: antponomar@gmail.com

Prokopyev Ilya R., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, Department of Geology of Ore Deposits, Geology and Geophysics department, Novosibirsk State University, Researcher, Laboratory of alkaline magmatism and ore-forming processes, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: prokop@igm.nsc.ru

Doroshkevich Anna G., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher, Head of the Laboratory of alkaline magmatism and ore-forming processes, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: anna-dor@yandex.ru

Semenova Dina V., graduate student, Researcher, Laboratory of isotope-analytical geochemistry, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia.

E-mail: sediva@igm.nsc.ru

Kravchenko Alexander A., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, Department of Regional Geology and Geoinformatics, North-Eastern Federal University of M.K. Ammosov, Senior Researcher, Acting Head of the Metallogeny, Laboratory of the Diamond and Precious Metal Geology, Institute of the SB RAS, Yakutsk, Russia.

E-mail: freshrock@yandex.ru

Ivanov Alexey I., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Research Associate, Laboratory of geodynamics and regional geology, Diamond and Precious Metal Geology, Institute of the SB RAS, Yakutsk, Russia.

E-mail: Leps_2002@mail.ru