

УДК 550.93:552.392.2(470.5)

DOI: 10.24930/1681-9004-2022-22-5-612-623

## **$^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ датирование пегматитов Мурзинско-Адуйского района (Средний Урал): результаты и их геологическая интерпретация**

**В. Н. Смирнов<sup>1</sup>, К. С. Иванов<sup>1</sup>, А. В. Травин<sup>2</sup>, А. В. Захаров<sup>1</sup>, Ю. В. Ерохин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15, e-mails: smirnov@igg.uran.ru, ivanovks55@ya.ru, zakharov-zav@yandex.ru, erokhin-yu@yandex.ru

<sup>2</sup>Институт геологии и минералогии СО РАН, 630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, e-mail: travin@igm.nsc.ru

Поступила в редакцию 12.05.2022 г., принята к печати 04.08.2022 г.

**Объект исследования.** Пегматиты Мурзинско-Адуйского района (восточный сектор Среднего Урала), представленные тремя типами жил: миароловые пегматиты с топазом и бериллом (копи Мокруша, Казённая, Семёновская), миароловые рубеллит-лепидолитовые пегматиты (Липовское жильное поле) и редкометалльные пегматиты с Ta-Nb-Be минерализацией (месторождения Квартальное и Липовый Лог). **Материалы и методы.** Изотопное датирование пегматитовых жил выполнено  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  методом с использованием масс-спектрометра Micromass 5400 в Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск) по слюдам разного состава (мусковитам, биотитам и лепидолитам). **Результаты.**  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  возраста по слюдам из датированных пегматитовых жил топаз-бериллиевых типа совпадают в пределах погрешности анализа: копи Казённая – 252.3 млн лет, Мокруша – 253.7 и Семёновская – 250.3 млн лет. Среднее значение возраста по двум анализам слюд из рубеллит-лепидолитовых пегматитов Липовского поля составляет 254.1 млн лет. Средний возраст по четырем пробам мусковитов из редкометалльных Ta-Nb-Be пегматитов – 252.6 млн лет. **Выводы.** Закрытие K-Ar изотопной системы слюд в пегматитах всех трех изученных типов – топаз-бериллиевых, рубеллит-лепидолитовых и редкометалльных с Ta-Nb-Be минерализацией – произошло практически одновременно в интервале от 254 до 250 млн лет назад. Полученные значения  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  возраста однако не могут отождествляться с временем образования пегматитов. Анализ имеющихся к настоящему времени данных свидетельствует о том, что закрытие K-Ar изотопной системы слюд изученных пегматитов, как и датированных ранее сланцев и blastsмилонитов Баженовской шовной зоны и гранитов Мурзинско-Адуйского блока, фиксируют важный эпизод в истории геологического развития восточной окраины Урала и фундамента прилегающей части Западно-Сибирской плиты – смену режима транспрессии, преобладающего на протяжении коллизионной стадии развития региона, на режим ограниченно-го постколлизийного растяжения.

**Ключевые слова:** пегматиты, Мурзинско-Адуйский район Среднего Урала,  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  возраст

### **Источник финансирования**

Статья подготовлена в процессе проведения работ по госбюджетной теме ИГГ УрО РАН № АААА-А18-118052590032-6 “Палеогеодинамика и эволюция структурно-вещественных комплексов при формировании земной коры континентального типа (на примере Урало-Монгольского складчатого пояса и Западно-Сибирской платформы)”

## **$^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ dating of pegmatites from Murzinka-Adui region (Middle Urals): Results and their geological interpretation**

**V. N. Smirnov<sup>1</sup>, K. S. Ivanov<sup>1</sup>, A. V. Travin<sup>2</sup>, A. V. Zakharov<sup>1</sup>, Yu. V. Erokhin<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS, 15 Akad. Vonsovsky st., Ekaterinburg 620016, Russia, e-mails: smirnov@igg.uran.ru, ivanovks55@ya.ru, zakharov-zav@yandex.ru, erokhin-yu@yandex.ru

<sup>2</sup>V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS (IGM SB RAS), 3 Akad. Koptug av., Novosibirsk 630090, Russia, e-mail: travin@igm.nsc.ru

Received 12.05.2022, accepted 04.08.2022

**Для цитирования:** Смирнов В.Н., Иванов К.С., Травин А.В., Захаров А.В., Ерохин Ю.В. (2022)  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  датирование пегматитов Мурзинско-Адуйского района (Средний Урал): результаты и их геологическая интерпретация. *Литосфера*, 22(5), 612-623. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-5-612-623>

**For citation:** Smirnov V.N., Ivanov K.S., Travin A.V., Zakharov A.V., Erokhin Yu.V. (2022)  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating of pegmatites from Murzinka-Adui region (Middle Urals): Results and their geological interpretation. *Lithosphere (Russia)*, 22(5), 612-623. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-5-612-623>

© В.Н. Смирнов, К.С. Иванов, А.В. Травин, А.В. Захаров, Ю.В. Ерохин, 2022

**Research subject.** The pegmatites of Murzinka-Adui region (Eastern sector of the Middle Urals), represented by three types of veins: miarolitic pegmatites with topaz and beryl (mines Mokrusha, Kazennitsa, Semenovskaia), miarolitic rubillite-lepidolite pegmatites (Lipovka veins field) and rare metal pegmatites with Ta-Nb-Be mineralization (deposits Kvartal'noe and Lipovyi Log). **Materials and methods.** Isotope dating was carried out via the <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar method by a mass spectrometer Micromass 5400 at the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS for mica of different composition (muscovites, biotites and lepidolites). **Results.** <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar ages for mica from dated pegmatite veins of the topaz-beryl type coincide within the measurement accuracy: mine Kazennitsa – 252.3 Ma, Mokrusha – 253.7 and Semenovskaia – 250.3 Ma. The average age of the two series of mica from rubillite-lepidolite pegmatites was found to be 254.1 Ma. The average age of four samples of muscovites from rare metal Ta-Nb-Be pegmatites equals 252.6 Ma. **Conclusions.** The closure of the isotope system of micas in pegmatites of all three studied types (topaz-beryllium, rubillite-lepidolite and rare-metal with Ta-Nb-Be mineralization) occurred almost simultaneously during the timeframe of 254 to 250 Ma years ago. The obtained age values, however, cannot be identified with the time of formation of pegmatites. The analysis of the available data suggests that the closure of the micas K-Ar isotope system of the studied pegmatites as well as previously dated schists and blastomylonites of the Bazhenovo suture zone and granites of the Murzinka-Adui block marks an important episode in the geological history of the eastern margin of the Urals and the basement of the adjacent part of the West Siberian plate: the change of the transpression regime prevailing during the collision stage of the region's development to the regime of limited postcollision extension.

**Keywords:** pegmatites, Murzinka-Adui region of the Middle Urals, <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar age

#### Funding information

The article was prepared according to the state budget theme of the IGG UB RAS No. AAAA-A18-118052590032-6 "Paleogeodynamics and evolution of structural-material complexes during the formation of the continental crust (on the example of the Ural-Mongolian fold belt and the West Siberian platform)"

## ВВЕДЕНИЕ

Пегматитовые жилы, разнообразные по составу, строению и содержанию полезных компонентов, широко распространены в пределах Мурзинско-Адуйского региона (восточный сектор Среднего Урала). Наиболее хорошо известны получившие мировую славу самоцветные пегматиты этого района, которые были открыты более 300 лет назад и активно отрабатывались с небольшими перерывами до настоящего времени (Ферсман, 1940; Таланцев, 1988; Емлин и др., 2002; Огородников и др., 2020; и др.). Содержащие самоцветы пегматитовые жилы миароловой фации представлены двумя разновидностями, различающимися по характеру минерализации. Первая является источником топаза и берилла. В классификации А.И. Гинзбурга с соавторами (1979) жилы этой разновидности соответствуют формации хрусталеносных пегматитов малых глубин, по более детально разработанной классификации В.Е. Загорского с соавторами (Загорский, Макагон, Шмакин, 2003), – топаз-бериллиевому минерагеническому эволюционному ряду кристаллоносной формации. Типоморфными минералами второй разновидности являются рубеллит и лепидолит. Отмечено присутствие органита (воробьевита), но его количество, по-видимому, не было значительным. Пегматиты такого состава принято относить к редкометалльной форма-

ции умеренных глубин (Гинзбург и др., 1979; и др.). В соответствии с рекомендациями В.Е. Загорского с соавторами (2003), миароловая фация таких пегматитов принадлежит берилл(морганит)-турмалиновому эволюционному ряду. Кроме того, как особый тип выделяются десилицированные апогранитные плагиоклазитовые жилы, считающиеся результатом преобразования кварц-полевошпатовых (топаз-бериллиевых) пегматитов (Емлин и др., 2002; Захаров, 2018; и др.). Во второй половине прошлого века в восточном и южном экзоконтактах Адуйского гранитного массива были открыты и разведаны месторождения и рудопроявления пегматитов с Ta-Nb-Be минерализацией (Левин и др., 2000; Золоев и др., 2004; Огородников и др., 2020), часть из них (Полуденское, Квартальное, Липовый Лог) к настоящему времени частично или полностью отработаны. Состав рудной минерализации (танталит-колумбит и берилл) свидетельствует о принадлежности пегматитов этого типа к редкометалльной формации умеренных глубин (Гинзбург и др., 1979; и др.). В систематике пегматитов, предложенной В.Е. Загорским с соавторами (2003), месторождения Адуйского пегматитового поля наиболее близки бериллиевому минерагеническому эволюционному ряду редкометалльной формации.

Оценка возрастных соотношений пегматитовых жил разного типа, развитых в рассматриваемой

мом районе, и выявление их связи с типом гранитоидов затруднены тем, что убедительные данные о времени формирования пегматитов отсутствуют, несмотря на неоднократные попытки их датирования разными изотопными методами (Попов и др., 2003; Mao et al., 2003; Смирнов и др., 2006; Хиллер и др., 2014, 2015; и др.). В связи с этим мы попытались продвинуться в решении этого вопроса по пути датирования слюд из разных типов пегматитовых жил  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  методом. Далее изложены результаты этих исследований, а также геологическая интерпретация полученных данных.

### ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ПЕГМАТИТОВЫХ ЖИЛ

Рассматриваемые в настоящей работе пегматиты залегают среди различных по составу и генезису пород в пределах двух крупных структур восточной части Среднего Урала: Мурзинско-Адуйского кристаллического блока и прилегающей к нему части Восточной вулканогенной зоны Урала (Смирнов и др., 2003; и др.).

Мурзинско-Адуйский кристаллический блок, сложенный разнообразными по составу высокометаморфизованными толщами и прорывающими их телами гранитоидов, имеет линзовидную в плане форму (рис. 1). В субмеридиональном направлении этот блок вытянут на 150 км при максимальной ширине около 30 км. От смежных геологических структур, представленных неметаморфизованными или слабометаморфизованными палеозойскими вулканогенными, вулканогенно-осадочными и осадочными толщами, он отделен разрывными нарушениями большой протяженности: Мурзинским разломом – с запада и Баженовской шовной зоной – с востока. Мурзинско-Адуйский блок характеризуется отчетливо выраженным асимметричным строением. Его западная часть сложена гнейсами, амфиболитами и кристаллическими сланцами с незначительным количеством мраморов, относящимися к адуйскому метаморфическому комплексу и алабашской серии (Государственная..., 2011; Казаков и др., 2017, 2019; и др.). Преобладающая часть исследователей рассматривает эти метаморфические толщи в качестве выступа докембрийского фундамента подвижного пояса. Авторы альтернативной точки зрения предполагают, что они являются результатом метаморфических преобразований и пластических деформаций пород палеозоя в глубинных частях островной дуги (Иванов, 2016а; и др.).

Восточную половину блока занимают различные по составу гранитоиды, относящиеся, по данным региональных геологических исследований, к трем плутоническим комплексам: средне-позднекаменноугольному каменскому гранодиорит-гра-

нитному, позднепермскому адуйскому гранитному и ранне-среднетриасовому мурзинскому гранит-лейкогранитному (Государственная..., 2011; Казаков и др., 2017, 2019; и др.). Гранитоиды образуют три крупных интрузивных массива и многочисленные мелкие тела среди метаморфических толщ. Породы адуйского комплекса слагают периферические части наиболее крупного Мурзинского массива, расположенного в северной части блока, а также целиком находящийся южнее Адуйский массив. Гранитоиды мурзинского комплекса, преобладающие в составе Мурзинского массива, распространены в его внутренних частях. Гранитоиды каменского комплекса образуют одноименный массив в южной части блока.

Восточная зона Среднего Урала представляет собой полосу ранне- и среднепалеозойских островодужных вулканогенных, вулканогенно-осадочных и осадочных толщ с многочисленными блоками и линзами пород офиолитовой ассоциации и комагматичными вулканитам интрузиями. Все перечисленные образования прорваны гранодиорит-гранитными и монцодиорит-гранитными массивами позднепалеозойского возраста. В прилегающей к Мурзинско-Адуйскому блоку части Восточной зоны, в границах Баженовской шовной зоны, разделяющей эти две геологические структуры, породы подверглись интенсивным деформациям в результате чего превращены в катаклазиты, бластомилониты, сланцы и в разной степени рассланцованные породы. Ширина полосы деформированных пород колеблется от нескольких километров до 10 км, степень деформаций сильно варьирует.

Наиболее широко распространены в пределах рассматриваемого района пегматиты топаз-бериллиевого типа, к числу которых относятся всемирно известные жилы Мокруша, Казённица, Тысячица, Семёновская, Топазница и др. Преобладающая часть таких жил располагается среди гнейсов западной половины блока, где они образуют ряд пегматитовых полей, которые, в свою очередь, включают серии обособленных групп. Мощность жил широко варьирует. Обычно она не превышает нескольких метров, но в копи Мокруша достигает 10–14 м. Описание жил этого типа приводится в многочисленных публикациях разных авторов (Ферсман, 1940; Таланцев, 1988; Емлин и др., 2002; Попов и др., 2020; и др.). Значительно реже пегматиты этого типа встречаются в восточном обрамлении гранитных массивов. В качестве примера можно указать на присутствие немногочисленных жил с топазом и бериллом вблизи восточного контакта Мурзинского массива в пределах Липовского жильного поля. В процессе проводившегося  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  датирования были использованы пробы слюд из пегматитовых жил Мокруша, Казённица и Семёновская (см. рис. 1).

Рубеллит-лепидолитовые пегматиты имеют значительно меньшее распространение. Наиболее крупным и хорошо изученным из выявленных скоплений пегматитовых жил этого типа является Липовское жильное поле, приуроченное к восточному контакту Мурзинского массива. Часть жил располагается среди серпентинитов провеса кровли в его эндоконтовой части, а преобладающая часть – в мраморах и серпентинитах экзоконтакта массива. Мощность жил этого типа, по имеющимся данным, не превышает 1.5 м. Характеристика пегматитов Липовского поля, так же, как и давно известных топаз-бериллиевых, приведена в ряде опубликованных ранее работ (Ферсман, 1940; Таланцев, 1988, Емлин и др., 2002; Захаров, Ерохин, 2013; Захаров, 2018, Попов и др., 2020; и др.). Примером рубеллит-лепидолитовых пегматитов, залегающих среди гнейсов западной части блока, являются копи Мора и Министерская Яма. В процессе исследований авторами было проведено <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar датирование двух проб слюд из пегматитовых жил Липовского поля.

Редкометалльные Ta-Nb-Be пегматиты образуют Адуйское жильное поле, протягивающееся вдоль восточной и южной экзоконтактовых зон одноименного гранитного массива. Породы экзоконтакта представлены здесь сланцами, амфиболитами и в разной степени рассланцованными породами различного состава, являющимися результатом дислокационного метаморфизма палеозойских толщ Восточной зоны в пределах Баженовской сутуры. В восточном направлении они постепенно сменяются слабометаморфизованными породами палеозоя. Адуйское пегматитовое поле включает серию пучков сближенных пегматитовых жил, образующих полосу шириной 0.5–1.5 км. Каждый такой пучок включает от 10 до нескольких десятков жил мощностью от нескольких десятков сантиметров до 40 м. В пределах Адуйского поля разведано несколько промышленных месторождений и рудопроявлений редких металлов (Полуденское, участок № 7, Квартальное, Липовый Лог, участок № 293, Красноармейское, Загадка). Детальная характеристика Адуйского пегматитового поля и приуроченных к нему месторождений дана в работах (Левин и др., 2000; Золоев и др., 2004). Для <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar датирования пегматитов Ta-Nb-Be типа авторами были использованы пробы слюд из пегматитов месторождений Квартальное и Липовый Лог.

#### ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБ, ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ДЛЯ <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar ДАТИРОВАНИЯ ПЕГМАТИТОВ

Для проведения <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar изотопно-геохронологических исследований были выделены мономинеральные фракции слюд из пегматитовых жил раз-

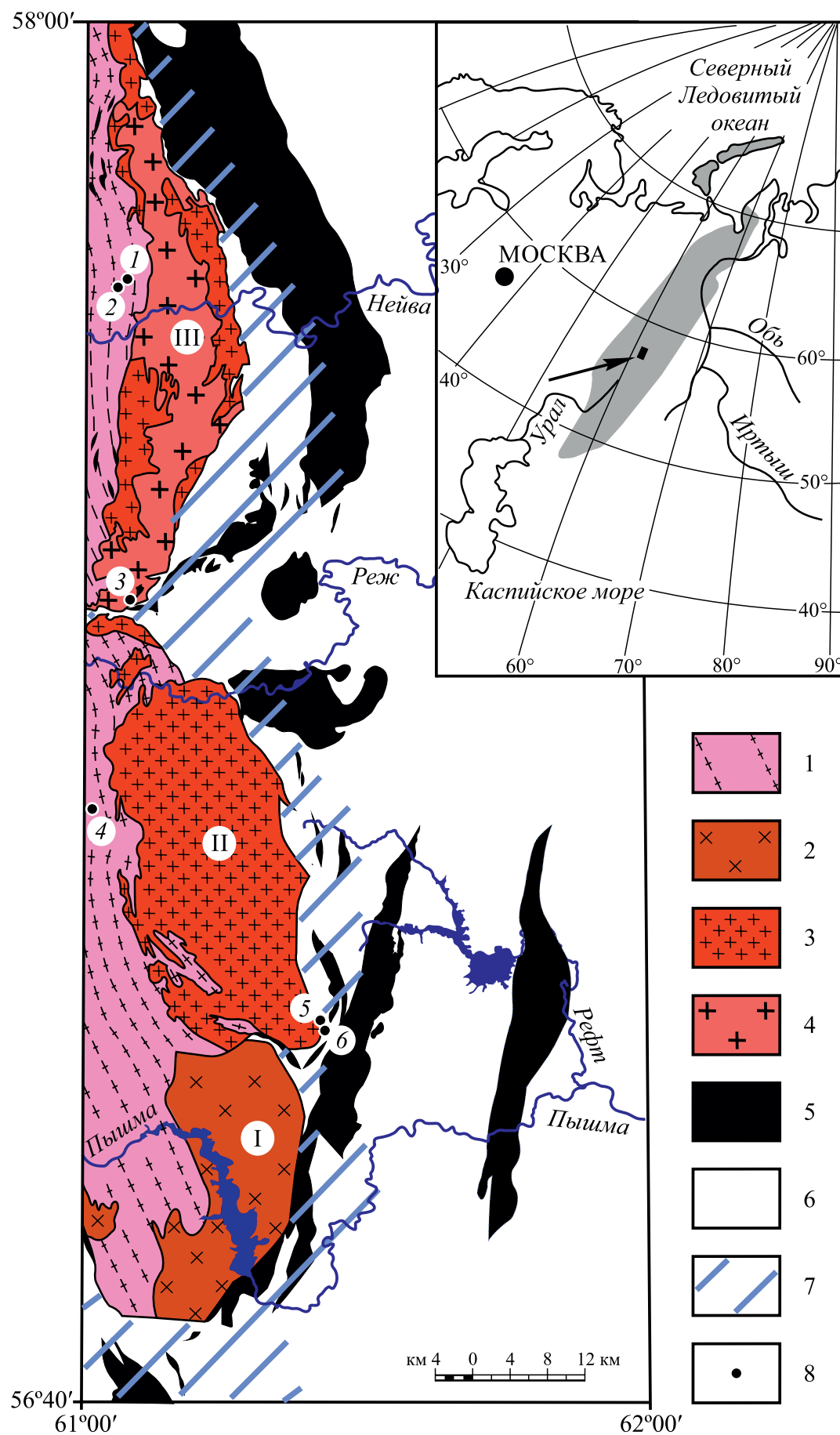
ного типа. Датирование редкометалльных пегматитов с танталониобатами и бериллом основано на анализе четырех монофракций мусковита. Проба Ад-59 отобрана из крупных чешуй мусковита в блоковом агрегате на месторождении Липовый Лог, проба Ад-88 – из пегматоидного агрегата этой же жилы. Еще две монофракции мусковита взяты из пегматитов месторождения Квартальное: проба Ад-63 – из зоны с блоковым строением и проба Ад-93 – из пегматоидного агрегата.

Для топаз-бериллиевых пегматитов была подобрана коллекция из шести мономинеральных фракций разных по составу слюд. Монофракции биотита Мз-337 и мусковита Мз-342 выделены из пегматоидного агрегата копи Казённая. Две пробы отобраны из кристаллоносных полостей (“занорышей”) в пегматитовой жиле копи Мокруша: лепидолит Мз-360 – из крупного зонального кристалла и мусковит Мз-351-1 – из мелко-среднечешуйчатого агрегата (“кипелки”). В пегматитах копи Семёновская из кварц-мусковитового ельчатого агрегата в блоковой зоне выделена проба мусковита Ад-71 и из пегматоидного агрегата – проба биотита Ад-75.

Слюды рубеллит-лепидолитовых пегматитов Липовского жильного поля представлены в изученной коллекции пробами мусковита и лепидолита. Проба лепидолита 1л/18 отобрана из кварц-лепидолит-альбитового агрегата в центральной части маломощной (30–40 см) жилы Сибирячка северо-восточного простирания, вскрытой в западной части карьера № 6 Липовского месторождения силикатно-никелевых руд. Проба мусковита 3л/13 выделена из зоны пегматоидных агрегатов, сложенных полевым шпатом, шерлом и кварцем, также маломощной (до 50 см) жилы Хитничьей, расположенной на небольшом удалении от Сибирячки в этой же части карьера № 6.

#### МЕТОДИКА <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования выполнялись по методике, описанной в работе А.В. Травина с соавторами (2009). Минеральные фракции для исследований были завернуты в алюминиевую фольгу и запаяны после дегазации в кварцевых ампулах. Облучение проводилось в кадмированном канале исследовательского реактора ФТИ ТПУ (г. Томск). В качестве мониторов использовались навески стандартных образцов биотита МСА-11 и LP-6. Нейтронный градиент не превышал 0.5% от размера образца. Эксперименты по ступенчатому прогреву проводились в кварцевом реакторе с печью внешнего прогрева. Выделенные газы очищались с помощью двух последовательных ZrAl-SAES-геттеров. Измерения изотопного состава аргона проводились на масс-спектрометре Micromass 5400. Холостой опыт установки ступенчатого прогрева по <sup>40</sup>Ar не превышал  $n10^{-10}$  нсм<sup>3</sup>.



**Рис. 1.** Схема геологического строения района с точками отбора проб для <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar датирования.

1 – высокометаморфизованные толщи Мурзинско-Адуйского блока; 2–4 – гранитоиды Мурзинско-Адуйского блока; 2 – гранодиориты каменского комплекса, 3 – граниты адуйского комплекса и 4 – граниты мурзинского комплекса; 5 – породы офиолитовой ассоциации; 6 – неметаморфизованные и слабометаморфизованные (за пределами зон деформаций) палеозойские породы разного состава и генезиса; 7 – площади развития деформированных пород; 8 – точки отбора проб. Гранитоидные массивы: I – Каменский, II – Адуйский, III – Мурзинский. Точки отбора проб: 1 – копь Казённая, 2 – копь Мокруша, 3 – жилы Сибирячка и Хитничья Липовского пегматитового поля, 4 – копь Семёновская, 5 – месторождение Квартальное, 6 – месторождение Липовый Лог. На карте-врезке серым цветом показана территория развития Уралид, черным прямоугольником – площадь основного рисунка.

**Fig. 1.** Geological scheme of the region with sampling sites for <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar datings.

1 – highly metamorphic strata of the Murzinka-Adui block; 2–4 – granitoids of Murzinka-Adui block: 2 – granodiorites of Kamenka complex, 3 – granites Adui complex and 4 – granites of Murzinka complex; 5 – the rocks of ophiolite association; 6 – non-metamorphic and weakly metamorphic (out of deformation zone) different in composition and genesis Paleozoic rocks; 7 – areas of deformed rocks; 8 – sampling sites. Granitoid massifs: I – Kamenka, II – Adui, III – Murzinka. Sampling sites: 1 – mine Kazennitsa, 2 – mine Mokrusha, 3 – veins Sibiriyachka and Hitnich'ya of Lipovka veins field, 4 – mine Semenovskaya, 5 – deposit Kwartal'noe, 6 – deposit Lipovyi Log.

On the cut-map grey color – zone of uralides developmet. Black rectangle show the place of main figure.

## РЕЗУЛЬТАТЫ <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar ДАТИРОВАНИЯ

Результаты исследований представлены на рис. 2 и в табл. 1. В возрастных <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar спектрах всех изученных образцов слюд выделяется кондиционное плато (см. рис. 2). Датировки, полученные по разным пегматитовым жилам топаз-бериллиевого типа, практически совпадают в пределах погрешности анализа. Среднее значение <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar возраста по двум пробам слюд (биотиту и мусковиту) из копи Казённая составляет 252.3 млн лет, по лепидолиту и мусковиту из копи Мокруша – 253.7, по пробам мусковита и биотита копи Семёновская – 250.3 млн лет.

<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar возраст по мусковиту из рубеллит-лепидолитового пегматита Липовского поля составляет 253.9 млн лет, а по лепидолиту – 254.3 млн лет, что определяет среднее по двум анализам значение – 254.1 млн лет.

Четыре <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar определения возраста, полученные по мусковитам из редкометалльных Ta-Nb-Be пегматитов Адуйского рудного поля, практически точно совпали, среднее значение <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar возраста по этим пробам 252.6 млн лет.

## ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Выполненное датирование слюд из пегматитовых жил, развитых в пределах Мурзинско-Адуйского района, показало, что <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar возраст во всех проанализированных пробах слюд из редкометалльных пегматитов с Ta-Nb-Be минерализацией имеет постоянную величину 252–253 млн лет, в жилах рубеллит-лепидолитового типа – близкое значение – 253.9–254.3 млн лет, а в пегматитах топаз-бериллиевого типа – слабо варьирует от 254 до 250 млн лет. Согласно этим данным, различия в <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar возрастах как между разными пегматитовыми жилами, относящимися к одному типу, так

и между пегматитами разного типа незначительны и не выходят за пределы погрешности датирования, имеющей величину от ±2.8 до ±3.6 млн лет (см. рис. 2). Это позволяет заключить, что закрытие K-Ar изотопной системы в пегматитах всех трех изученных типов произошло практически одновременно в интервале времени от 254 до 250 млн лет назад.

При этом возраста, полученные по тем же пегматитам другими изотопными методами (рис. 3), заметно различаются в сторону как омоложения, так и более древних значений (Попов и др., 2003, Mao et al., 2003, Смирнов и др., 2006, Хиллер и др., 2014, 2015; и др.). Очевидно, что молодые значения Rb-Sr возраста (Попов и др., 2003) легко объяснимы влиянием неоднократно повторявшихся наложенных термальных воздействий. Значительно больший интерес представляют немногочисленные пока возрастные данные, более древние по сравнению с результатами <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar датирования. Re-Os возраст, полученный по молибдениту из пегматитов с Ta-Nb-Be минерализацией месторождения Липовый Лог, имеет величину 262 ± 7.3 млн лет (Mao et al., 2003), а при Th-U-Pb химическом датировании монацита и уранинита из аналогичных пегматитов месторождения Квартальное получена изохрона с возрастом 267.9 ± 2.1 млн лет (Хиллер и др., 2015). Совпадающие в пределах погрешности определения значения возраста, полученные этими методами, позволяют заключить, что формирование пегматитов рассматриваемого типа произошло (или по крайней мере началось) 267 ± 2 млн лет назад (среднее взвешенное по трем перечисленным датировкам). Близкую величину возраста 266.4 ± 2.6 млн лет определяет трехминеральная (уранинит-коффинит-монацитовая) изохрона, полученная методом Th-U-Pb химдатирования по миароловым (топаз-бериллиевым) пегматитам Липовского жильного поля (Хиллер и др., 2014; Захаров, 2018).

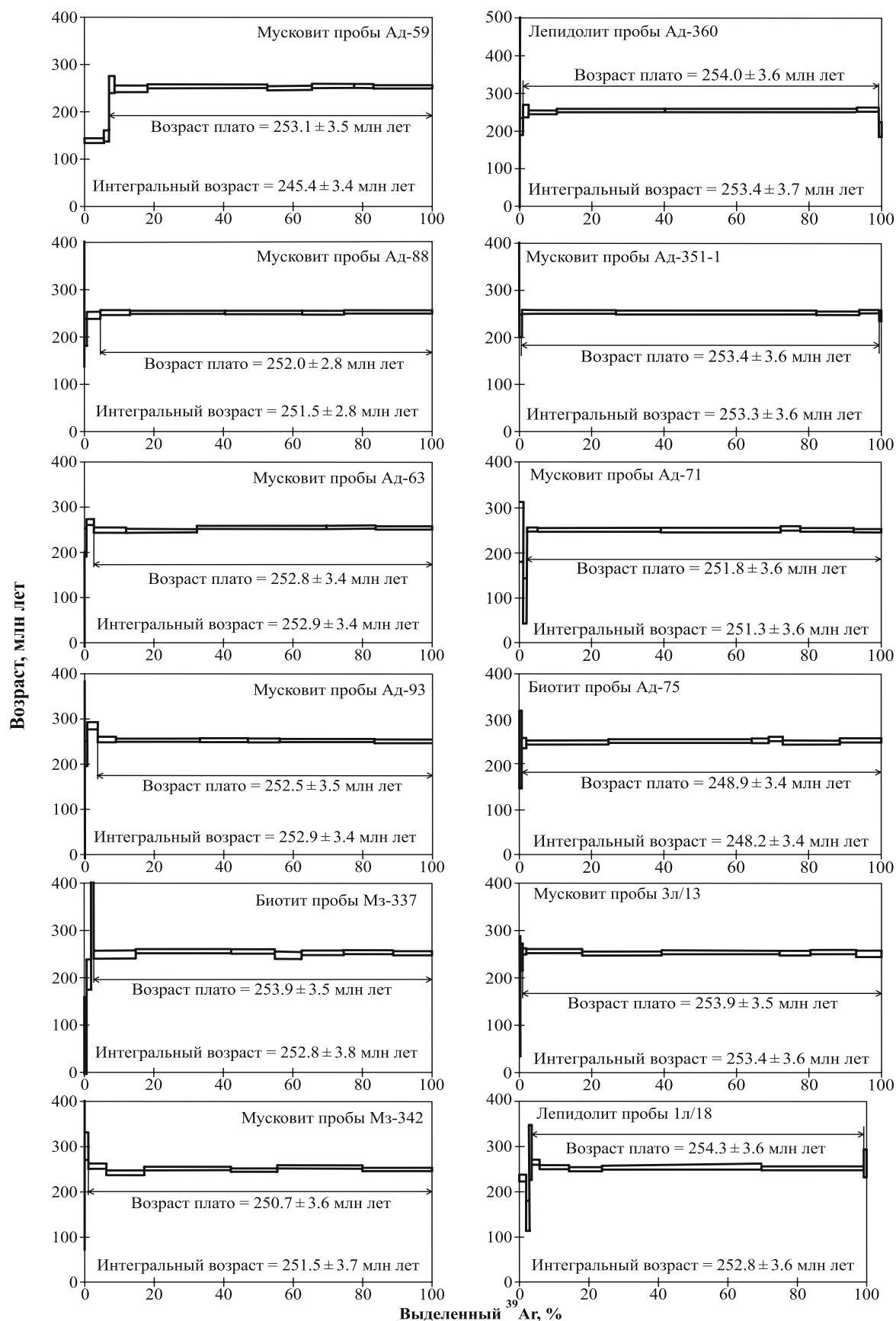


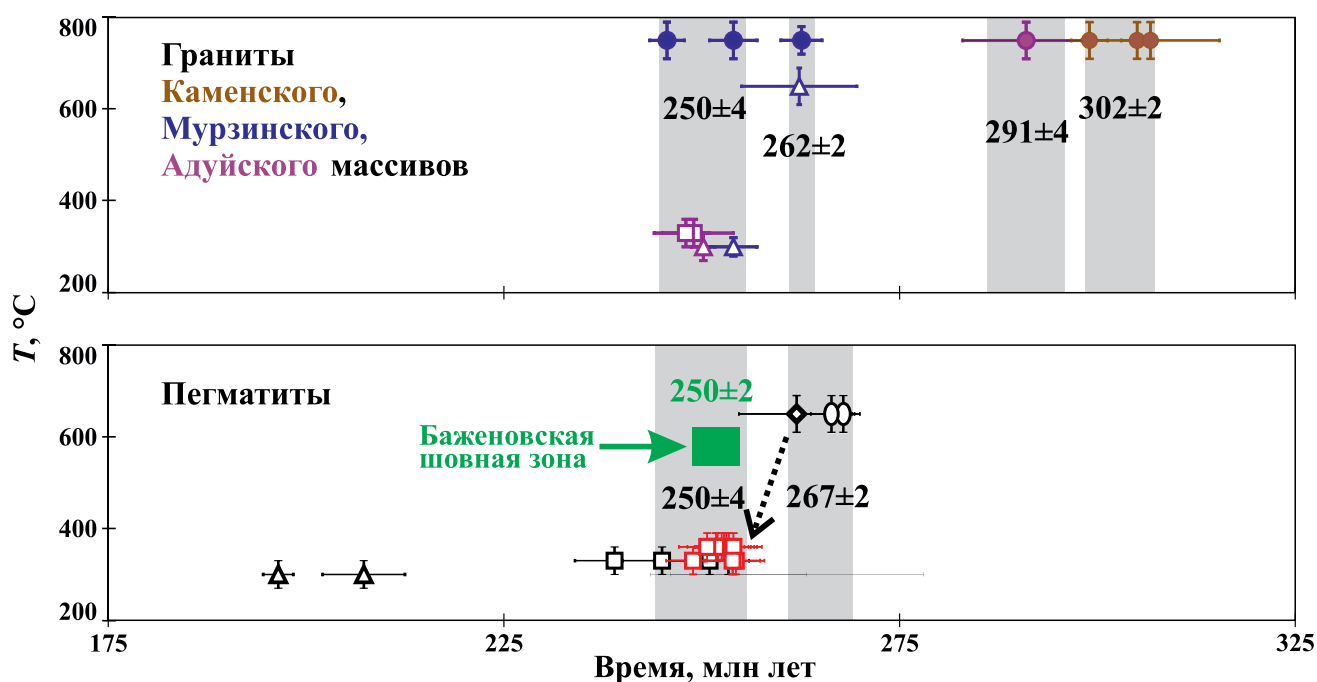
Рис. 2.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  возрастные спектры слюд из пегматитов Мурзинско-Адуйского района.

Fig. 2.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age spectras of micas from pegmatites of the Murzinka-Adui region.

**Таблица 1.** Результаты <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar датирования слюд из пегматитов Мурзинско-Адуйского района

**Table 1.** The results of <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar age of micas from pegmatites of Murzinka-Adui region

Тип пегматита	Объект	Номер пробы	Характеристика анализируемого материала	Возраст, млн лет
Редкометалльные пегматиты с танталониобатами и бериллом	М-е Липовый Лог	Ад-59	Мусковит из блокового агрегата	253.1 ± 3.5
		Ад-88	Мусковит из пегматоидного агрегата	252.0 ± 2.8
	М-е Квартальное	Ад-63	Мусковит из блокового агрегата	252.8 ± 3.4
		Ад-93	Мусковит из пегматоидного агрегата	252.5 ± 3.5
Пегматиты топаз-бериллиевые типа	Копь Казённица	Мз-337	Биотит из пегматоидного агрегата	253.9 ± 3.5
		Мз-342	Мусковит из пегматоидного агрегата	250.7 ± 3.6
	Копь Мокруша	Мз-360	Лепидолит, зональный кристалл из “занорыша”	254.0 ± 3.6
		Мз-351-1	Мусковит средне-мелкочешуйчатого агрегата (“кипелки”) в занорыше	253.4 ± 3.6
	Копь Семёновская	Ад-71	Мусковит из кварц-мусковитового ельчатого агрегата в блоковой зоне	251.8 ± 3.6
		Ад-75	Биотит из пегматоидного агрегата	248.9 ± 3.4
Рубеллит-лепидолитовые пегматиты	Липовское жильное поле	Зл/13	Мусковит из пегматоидного агрегата	253.9 ± 3.5
		Лл/18	Лепидолит из кварц-лепидолит-альбитового агрегата, слагающего центральную часть жилы	254.3 ± 3.6



U/Pb: ● – циркон; K/Ar, <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar: □ – слюды; Rb/Sr: Δ – вал, пш, слюды;  
 Re/Os: ◇ – молибденит; U-Th-Pb хим. метод: ○ – монацит, уранинит, коффинит.

**Рис. 3.** Термохронология Мурзинско-Адуйского района.

**Fig. 3.** Termochronology of the Murzinka-Adui region.



Возраст гранитов Мурзинско-Адуйского блока, которые, по-видимому, являются материнскими, по крайней мере, для части рассматриваемых в настоящей работе пегматитовых жил, достоверно не установлен. Для гранитов адуйского комплекса наиболее вероятными, по-видимому, следует считать совпадающие значения возраста  $260 \pm 6$  и  $263 \pm 3$  млн лет (см. рис. 3), полученные Rb-Sr и U-Pb (SHRIMP II) методами для образцов, отобранных в пределах Мурзинского массива (Попов и др., 2003; Казаков и др., 2019). Наряду с ними по циркону из гранитов и адамеллитов, отобранных в пределах Адуйского массива, U-Pb (LA-ICP-MS) методом был получен более древний возраст –  $291 \pm 8$  млн лет (Краснобаев и др., 2006) и значительно более молодые K-Ar датировки – 251–245 млн лет (Смирнов и др., 2006). Возраст гранитоидов мурзинского комплекса, отобранных в пределах Мурзинского массива, полученный по цирконам из гранита  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  методом, составляет  $254 \pm 5$  млн лет (Montero et al., 2000), а по цирконам из порфирового гранита, измеренный U-Pb (SHRIMP-II) методом, –  $245.6 \pm 2$  млн лет (Казаков и др., 2019).

Приведенные данные позволяют считать, что внедрение редкометалльных (Ta-Nb-Be) пегматитов, приуроченных к восточному экзоконтакту Адуйского массива, происходило, по всей вероятности, практически одновременно с кристаллизацией слагающих этот массив гранитов адуйского комплекса (около 262 млн лет назад), что свидетельствует о генетическом родстве этих образований. Уверенно судить о времени образования самоцветных (как топаз-бериллиевых, так и рубеллит-лепидолитовых) пегматитов и их связи с гранитами по имеющимся к настоящему времени данным не представляется возможным.

Полученные данные показали, что  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  возраста пегматитов значительно моложе значений возраста, полученных другими изотопными методами. Аналогичные различия наблюдаются также между Rb-Sr и U-Pb возрастами гранитов адуйского комплекса (Попов и др., 2003; Казаков и др., 2019) и их K-Ar датировками (Смирнов и др., 2006). Столь отчетливо выраженная разница в величинах возрастов, полученных разными методами, нуждается в объяснении. Большое значение для выяснения причин наблюдаемых различий имеет тот факт, что закрытие K-Ar изотопной системы слюд изученных пегматитов и гранитов адуйского комплекса протекало синхронно с поздними дислокациями крупного тектонического нарушения Баженовской шовной зоны, разделяющей Мурзинско-Адуйский кристаллический блок и Восточную вулканогенную зону. Главным типом тектонических движений в пределах этой сутуры являются левосдвиговые смещения значительной амплитуды, которые на завершающих этапах коллизионной стадии развития сменяются движениями сбросо-

со-сдвигового характера. Проведенными ранее  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  исследованиями установлено, что сбросо-сдвиговые дислокации протекали в интервале времени 253.0–247.6 млн лет (см. рис. 3, среднее значение возраста по 5 анализам слюд – 251 млн лет) (Смирнов, Иванов, 2019; Смирнов и др., 2019), т. е. совпадение со временем закрытия K-Ar изотопной системы слюд в пегматитах и гранитах практически точное. Идентичность  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  возрастов слюд из разных по составу пород на обширной территории Мурзинско-Адуйского блока и ограничивающей его с востока Баженовской сутуры свидетельствует о том, что они фиксируют термальное событие, повсеместно проявившееся в пределах этой территории. Следует отметить при этом, что для пегматитов рубеллит-лепидолитового типа возрастов, более древних чем 250 млн лет, пока не получено. В связи с этим нельзя исключить возможность того, что для жил этого типа полученные  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  датировки соответствуют времени их образования.

При анализе места и роли этого выявленного по результатам  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  датирования события в истории геологического развития востока Урала (Иванов и др., 2003, 2016б; Смирнов и др., 2003; Государственная..., 2011; Смирнов, Иванов, 2019; и др.) становится очевидным, что полученные  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  датировки пегматитов (254–250 млн лет, что примерно отвечает границе перми и триаса) соответствуют моменту перехода от режима транспрессии, обусловившего смещения левосдвигового характера на ранних этапах формирования Баженовской шовной зоны, к ограниченному постколлизиионному растяжению (Иванов, 1998), что выразилось в появлении сбросовой составляющей тектонических движений. В результате этого импульса растяжения на востоке Урала крупные сиалические блоки средней коры (граниты, гнейсы, кристаллические сланцы, сформировавшиеся глубже 10 км), в число которых входит Мурзинско-Адуйский блок, были выведены на поверхность земли или на уровень верхней коры (т. е. на глубины менее 10 км) (Иванов, 1998), в результате чего возникла современная структура Урала с ее главной особенностью – чередованием субмеридиональных зон, сложенных высокометаморфизованными и слабометаморфизованными породами. Согласно реологической модели строения континентальной земной коры (Ivanov, Ivanov, 1993; Иванов, Иванов, 2018; и др.), именно на глубине около 10 км (8–11 км в зависимости от температуры, состава и прочности горных пород в том или ином месте) располагается важнейшая реологическая граница сиалической земной коры – *отделитель*. Выше него поровые флюиды (вода и др.) находятся еще при гидростатическом давлении, а ниже – давление на флюид уже литостатическое. Таким образом, в процессе подъема глубинных блоков давление на флюид

резко ( $\approx$  в 3 раза) уменьшается при переходе отделителя, что сопровождается сильным понижением температуры вследствие адиабатического расширения и дроссельного эффекта (Иванов, Иванов, 2018). Таким образом, можно обоснованно предполагать, что выявленные нами <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar значения абсолютного возраста (252 млн лет) фиксируют момент подъема Мурзинско-Адуйского гранитоидного блока, а точнее, его прохождения через уровень глубины 10 км, т. е. отделителя. По вполне понятным причинам аналогичные значения <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar возраста имеют и продукты дислокационного метаморфизма Баженовской сутуры, являвшейся плоскостью сместителя во время этого эпизода тектонической активности. Согласно опубликованным данным, к этому же времени относится формирование системы меридиональных грабен-рифтов на востоке Урала (Каретин, 1965; Расулов, 1982; Rasulov et al., 1997; и др.) и особенно широко – в пределах смежной части Западно-Сибирской плиты (Сурков и др., 1997; Иванов и др., 2016б; Иванов, Ерохин, 2019; и др.).

Таким образом, полученные <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar датировки слюд изученных пегматитов Мурзинско-Адуйского района не могут интерпретироваться как время образования этих пород (исключение составляют жилы рубеллит-лепидолитового типа, для которых этот вопрос остается открытым). Анализ всех рассмотренных данных позволяет заключить, что закрытие К-Аг изотопной системы слюд изученных пегматитов, а также датированных ранее сланцев и бластомилонитов Баженовской шовной зоны и гранитов Мурзинско-Адуйского блока фиксирует важный эпизод в истории геологического развития восточной окраины Урала и фундамента прилегающей части Западно-Сибирской плиты – смену режима транспрессии, преобладающего на протяжении коллизионной стадии развития региона, на режим ограниченного постколлизийного растяжения.

## ВЫВОДЫ

Закрытие К-Аг изотопной системы слюд в пегматитах всех трех изученных типов – топаз-бериллиевых, рубеллит-лепидолитовых и редкометаллических с Ta-Nb-Be минерализацией – произошло практически одновременно в интервале времени от 254 до 250 млн лет. Полученные значения <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar возраста, однако, не могут отождествляться с временем образования пегматитов. Анализ имеющихся к настоящему времени данных свидетельствует о том, что закрытие К-Аг изотопной системы слюд изученных пегматитов, как и датированных ранее сланцев и бластомилонитов Баженовской шовной зоны и гранитов Мурзинско-Адуйского блока, фиксирует важный эпизод в истории геологического развития восточной окраины Урала и фундамента

прилегающей части Западно-Сибирской плиты – смену режима транспрессии, преобладающего на протяжении коллизионной стадии развития региона, на режим ограниченного постколлизийного растяжения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гинзбург А.И., Тимофеев И.Н., Фельдман Л.Г. (1979) Основы геологии гранитных пегматитов. М.: Недра, 296 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Сер. Уральская. Л. О-41 – Екатеринбург. Объяснительная записка. (2011) СПб.: Картофабрика ВСЕГЕИ, 492 с.
- Емлин Э.Ф., Вахрушева Н.В., Кайнов В.И. (2002) Самоцветная полоса Урала: Режевской государственный природно-минералогический заказник. Путеводитель. Екатеринбург; Реж, 156 с.
- Загорский В.Е., Макагон В.М., Шмакин Б.М. (2003) Систематика гранитных пегматитов. *Геология и геофизика*, **44**(5), 422-435.
- Захаров А.В. (2018) Вещественный состав, типизация и возраст гранитных пегматитов Липовского жилого поля (Средний Урал). *VII Чтения памяти чл.-корр. РАН С.Н. Иванова*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 80-82.
- Захаров А.В., Ерохин Ю.В. (2013) Кадастр минеральных видов Липовского рудного поля. *Вестн. Уральского отделения РМО*, **10**, 38-46.
- Золотов К.К., Левин В.Я., Мормиль С.И., Шардакова Г.Ю. (2004) Минерогения и месторождения редких металлов, молибдена, вольфрама Урала. Екатеринбург: Министерство природных ресурсов РФ; ГУПР по Свердловской области; ИГГ УрО РАН; ОАО УГЭС, 336 с.
- Иванов К.С. (1998) Современная структура Урала – результат послепалеозойского растяжения земной коры. *Геология и геофизика*, **39**(2), 204-210.
- Иванов К.С., Ерохин Ю.В. (2019) О времени заложения системы триасовых рифтов Западной Сибири. *Докл. АН*, **486**(1), 88-92. <https://doi.org/10.31857/S0869-5652486188-92>
- Иванов К.С., Панов В.Ф., Лиханов И.И., Козлов П.С., Пономарев В.С., Хиллер В.В. (2016а) Докембрий Урала. *Горные ведомости*, **148**(9), 4-21.
- Иванов К.С., Федоров Ю.Н., Ерохин Ю.В., Пономарев В.С. (2016б) Геологическое строение фундамента Приуральской части Западно-Сибирского нефтегазоносного мегабассейна. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 302 с.
- Иванов К.С., Федоров Ю.Н., Коротеев В.А., Печеркин М.Ф., Кормильцев В.В., Погромская О.Э., Ронкин Ю.Л., Ерохин Ю.В. (2003) Строение и природа области сочленения Урала и Западной Сибири. *Докл. АН*, **393**(5), 647-651.
- Иванов С.Н., Иванов К.С. (2018) Реологическая модель строения Земной коры (модель 3-го поколения). *Литосфера*, **18**(4), 500-519. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-4-500-519>
- Казаков И.И., Стороженко Е.В., Харитонов И.Н., Стефановский В.В., Кошевой Ю.Н., Козьмин С.В., Марты-

- нов С.Э., Фадеичева И.Ф., Ронкин Ю.Л., Лукин В.Г. (2017) Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Изд. 2-е. Сер. Средне-Уральская. Л. О-41-XXVI – Асбест. Объяснительная записка. СПб.: Картограф. фабрика ВСЕГЕИ, 284 с.
- Казаков И.И., Стороженко Е.В., Кривко Т.Н., Рыльков С.А., Прутьян А.М., Ронкин Ю.Л. (2019) Геологическое строение и минералогия зоны Мурзинского гранитового массива на восточном склоне Среднего Урала. *Разведка и охрана недр*, (3), 22-31.
- Каретин Ю.С. (1965) О роли сдвиговых дислокаций в формировании нижнемезозойских депрессий и структуры восточного склона Урала. *Изв. АН СССР. Сер. геол.*, (10), 45-62.
- Краснобаев А.А., Ферштатер Г.Б., Беа Ф., Монтеро П. (2006) Полигенные цирконы Адуйского батолита (Средний Урал). *Докл. АН*, **410**(2), 244-250.
- Левин В.Я., Ласковенков А.Ф., Мормиль С.И., Львов Б.К., Петрова Н.И. (2000) Геология и минералогия редкометаллических гранитных пегматитов Адуйского рудного поля. *Геология и металлогения Урала*. (Ред. К.К. Золоев). Екатеринбург: Департамент природных ресурсов уральского региона; УГСЭ, 108-151.
- Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Кисин А.Ю., Савичев А.Н. (2020) Гранитные пегматиты и пегматоиды Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 432 с.
- Попов В.С., Богатов В.И., Петрова А.Ю., Беяцкий Б.В. (2003) Возраст и возможные источники гранитов Мурзинско-Адуйского блока, Средний Урал: Rb-Sr и Sm-Nd изотопные данные. *Литосфера*, (4), 3-18.
- Попов М.П., Маликов А.И., Захаров А.В., Попова Е.Н., Волохин С.Л., Минеева Е.В., Черных У.С., Сергушин А.В. (2020) Каменные кладовые Самоцветной полосы Урала. Природно-минералогический заказник “Режевской”. Екатеринбург: ДжиЛайм, 160 с.
- Расулов А.Т. (1982) Тектоника раннемезозойских впадин восточного склона Урала. Свердловск: ИГГ УНЦ АН, 43 с.
- Смирнов В.Н., Иванов К.С. (2019) Структурные связи Урала и Западной Сибири: единый этап формирования на границе перми и триаса. *Докл. АН*, **488**(3), 65-68. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524883294-297>
- Смирнов В.Н., Иванов К.С., Краснобаев А.А., Бушляков И.Н., Калеганов Б.А. (2006) Результаты К-Аг датирования Адуйского гранитного массива (восточный склон Среднего Урала). *Литосфера*, (2), 148-156.
- Смирнов В.Н., Иванов К.С., Травин А.В. (2019)  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  возраст деформаций пород в Баженовской шовной зоне (восточная окраина Среднего Урала). *Литосфера*, 19(2), 242-249. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-2-242-249>
- Смирнов В.Н., Ферштатер Г.Б., Иванов К.С. (2003) Схема тектономагматического районирования территории восточного склона Среднего Урала. *Литосфера*, (2), 45-56.
- Сурков В.С., Казаков А.М., Девятков В.П., Смирнов Л.В. (1997) Нижне-среднетриасовый рифтогенный комплекс Западно-Сибирского бассейна. *Отчет. геол.*, (3), 31-37.
- Таланцев А.С. (1988) Камерные пегматиты Урала. М.: Наука, 144 с.
- Травин А.В., Юдин Д.С., Владимиров А.Г., Хромых С.В., Волкова Н.И., Мехоношин А.С., Колотилина Т.Б. (2009) Термохронология Черноурдской гранулитовой зоны (Ольхонский регион, Западное Прибайкалье). *Геохимия*, (11), 1181-1199.
- Ферсман А.Е. (1940) Пегматиты. М.: АН СССР, 712 с.
- Хиллер В.В., Ерохин Ю.В., Захаров А.В., Иванов К.С. (2014) Th-U-Pb датирование гранитных пегматитов Липовского рудного поля (Урал) по трем минералам. *Докл. АН*, **455**(2), 216-219.
- Хиллер В.В., Попов М.П., Ерохин Ю.В., Захаров А.В. (2015) Th-U-Pb возраст редкометаллических гранитных пегматитов в восточном экзоконтакте Адуйского массива (Средний Урал). *Вестн. ВГУ. Сер. Геология*, (4), 61-65.
- Ivanov S.N., Ivanov K.S. (1993) Hydrodynamic Zoning of the Earth's crust and its Significance. *J. Geodyn.*, **17**(4), 155-180.
- Mao J., Du A., Seltmann R., Yu J. (2003) Re-Os ages for the Shameika porphyry Mo deposit and the Lipovy Log rare metal pegmatite, Central Urals, Russia. *Mineral. Depos.*, **38**, 251-257.
- Montero P., Bea F., Gerdes A., Fershtater G., Zin'kova E., Borodina N., Osipova T., Smirnov V. (2000) Single-zircon evaporation ages and Rb-Sr dating of major Variscan batholiths of the Urals: a perspective on the timing of deformation and granite generation. *Tectonophysics*, **317**(1-2), 93-108.
- Rasulov A., Bankwitz P., Bankwitz E. (1997) Triassische Grabenbildung und altkimmerische Deformation am Ostrand der Osteuropaischen Tafel. *ZGV. Berlin*, **25**(1/2), 203-228.

## REFERENCES

- Emlin E.F., Vakhrusheva N.V., Kainov V.I. (2002) Gem strip of the Urals: Rezh state natural-mineralogical reserve. Guidebook. Ekaterinburg; Rezh, 156 p. (In Russ.)
- Fersman A.E. (1940) Pegmatites. Moscow, AN SSSR, 712 p. (In Russ.)
- Ginzburg A.I., Timofeev I.N., Feldman L.G. (1979) Fundamentals of the geology of granite pegmatites. Moscow, Nedra Publ., 296 p. (In Russ.)
- Ivanov K.S. (1998) Modern structure of the Urals – the result of the post-Paleozoic stretching of the Earth's crust. *Geol. Geofiz.*, **39**(2), 204-210. (In Russ.)
- Ivanov K.S., Erokhin Yu.V. (2019) About the time of forming the system of Triassic rifts in Western Siberia. *Dokl. Akad. Nauk*, **486**(1), 88-92. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869-5652486188-92>
- Ivanov K.S., Fedorov Yu.N., Koroteev V.A., Pecherkin M.F., Kormiltsev V.V., Pogromskaya O.E., Ronkin Yu.L., Erokhin Yu.V. (2003) Structure and genesis region of joint Urals and Western Siberie. *Dokl. Akad. Nauk*, **393**(5), 647-651. (In Russ.)
- Ivanov K.S., Fedorov Yu.N., Erokhin Yu.V., Ponomarev V.S. (2016) Geological structure of the basement of near the Urals part of West-Siberian oil and gas bearing mega pool. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 302 p. (In Russ.)
- Ivanov K.S., Panov V.F., Likhonov I.I., Kozlov P.C., Ponomarev V.S., Khiller V.V. (2016a) Precambrian of the Urals. *Gornye Vedomosti*, **148**(9), 4-21. (In Russ.)
- Ivanov S.N., Ivanov K.S. (1993) Hydrodynamic Zoning of the Earth's crust and its Significance. *J. Geodynamics*, **17**(4), 155-180.

- Ivanov S.N., Ivanov K.S. (2018) Riologic model of the Earth's crust structure (the third generation of model). *Lithosphere (Russia)*, **18**(4), 500-519. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-4-500-519>
- Karetin Yu.S. (1965) About the role of shear dislocations in the formation of early Mesozoic depressions and structure of the eastern slope of the Urals. *Izv. AN USSR. Ser. geol.*, (10), 45-62. (In Russ.)
- Kazakov I.I., Storozhenko E.V., Krivko T.N., Ril'kov S.A., Prut'yan A.M., Ronkin Yu.L. (2019) Geological structure and minerageniya of Murzinka granite massif zone in eastern slope of Middle Urals. *Razvedka i Okhrana nedr*, (3), 22-31. (In Russ.)
- Kazakov I.I., Storozhenko E.V., Stefanovskii V.V., Koshvoi Yu.N., Koz'min S.V., Martynov S.A., Fadeicheva I.F., Ronkin Yu.L., Lukin V.G. (2017) The State geological map of the Russian Federation, scale 1 : 200 000. 2nd ed. List O-41-XXVI – Asbest. Explanatory note. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 284 p. (In Russ.)
- Khillar V.V., Erokhin Yu.V., Zakharov A.V., Ivanov K.S. (2014) Th-U-Pb dating of granite pegmatites of the Lipovka ore field (Urals) based on three minerals. *Dokl. Akad. Nauk*, **455**(2), 216-219. (In Russ.)
- Khillar V.V., Popov M.P., Erokhin Yu.V., Zakharov A.V. (2015) Th-U-Pb age of rare-metal granite pegmatites in the eastern exocontact of the Adui massif (Middle Urals). *Vestn. VGU. Ser. Geol.*, (4), 61-65. (In Russ.)
- Krasnobaev A.A., Fershtater G.B., Bea F., Montero P. (2006) Polygenic zircons of the Adui batholith (Middle Urals). *Dokl. Akad. Nauk*, **410**(2), 244-250. (In Russ.)
- Levin V.Ya., Laskovenkov A.F., Mormil S.I., Lvov B.K., Petrova N.I. (2000) Geology and minerageny of rare-metal granite pegmatites of the Adui ore field. Geology and metallogeny of the Urals. (Ed K.K. Zoloev). Ekaterinburg, Departament prirodnikh resursov ural'skogo regiona; OAO UGSE Publ., 108-151. (In Russ.)
- Mao J., Du A., Seltmann R., Yu J. (2003) Re-Os ages for the Shameika porphyry Mo deposit and the Lipov Log rare metal pegmatite, Central Urals, Russia. *Mineral. Depos.*, **38**, 251-257.
- Montero P., Bea F., Gerdes A., Fershtater G., Zin'kova E., Borodina N., Osipova T., Smirnov V. (2000) Single-zircon evaporation ages and Rb-Sr dating of major Variscan batholiths of the Urals: a perspective on the timing of deformation and granite generation. *Tectonophysics*, **317**(1-2), 93-108.
- Ogorodnikov V.N., Polenov Yu.A., Kissin A.Yu., Savichev A.N. (2020) Granitic pegmatites and pegmatoids of the Urals. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 432 p. (In Russ.)
- Popov M.P., Malikov A.I., Zakharov A.V., Popova E.N., Volokhin S.L., Mineeva E.V., Chernykh U.S., Sergushin A.V. (2020) Stone pantries of the Semi-precious strip of the Urals. Natural and mineralogical reserve "Rezhevskoy". Ekaterinburg, GeeLime Publ., 160 p. (In Russ.)
- Popov V.S., Bogatov V.I., Petrova A.Yu., Belyatsky B.V. (2003) Age and possible sources of granites of the Murzinka-Adui block, Middle Urals: Rb-Sr and Sm-Nd isotope data. *Lithosphere (Russia)*, (4), 3-18. (In Russ.)
- Rasulov A.T. (1982) Tectonics of early Mesozoic basins of the eastern slope of the Urals. Sverdlovsk, IGG USC AN USSR, 43 p. (In Russ.)
- Rasulov A., Bankwitz P., Bankwitz E. (1997) Triassische Grabenbildung und altkimmerische Deformation am Ostrand der Osteuropaischen Tafel. *ZGV. Berlin*, **25**(1/2), 203-228.
- Smirnov V.N., Fershtater G.B., Ivanov K.S. (2003) Scheme of tectonomagmatic zoning of the Middle Urals. *Lithosphere (Russia)*, (2), 45-56. (In Russ.)
- Smirnov V.N., Ivanov K.S. (2019) Structural links between the Urals and Western Siberia: a single stage of formation at the border of the Permian and Triassic. *Dokl. Akad. Nauk*, **488**(3), 65-68. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0869-56524883294-297>
- Smirnov V.N., Ivanov K.S., Krasnobaev A.A., Bushlyakov I.N., Kaleganov B.A. (2006) Results of K-Ar dating of the Adui granite massif (eastern slope of the Middle Urals). *Lithosphere (Russia)*, (2), 148-156. (In Russ.)
- Smirnov V.N., Ivanov K.S., Travin A.V. (2019) <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar-age of rock deformations in the Bazhenov suture zone (eastern margin of the Middle Urals). *Lithosphere (Russia)*, **19**(2), 242-249. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2019-19-2-242-249>. (In Russ.)
- Surkov V.S., Kazakov A.M., Devyatov V.P., Smirnov L.V. (1997) Lower-Middle Triassic rift complex of the West-Siberian basin. *Otech. Geol.*, (3), 31-37. (In Russ.)
- Talantsev A.S. (1988.) Chamber pegmatites of the Urals. Moscow, Nauka Publ., 144 p. (In Russ.)
- The state geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1 000 000 (third generation). Series Uralic. List O-41 – Yekaterinburg. Explanatory note. (2011) St. Petersburg, VSEGEI Publ., 492 p. (In Russ.)
- 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 (the Olkhon district, western pri-Baikal'e region). *Geokhimiya*, (11), 1181-1199. (In Russ.)
- Zagorskii V.Ye., Makagon V.M., Shmakin B.M. (2003) Systematics of granitic pegmatites. *Geol. Geofiz.*, **44**(5), 422-435. (In Russ.)
- Zakharov A.V. (2018) Material composition, typing and age of granite pegmatites from Lipovka vein field (Middle Urals). *VII S.N. Ivanov reading*. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 80-82. (In Russ.)
- Zakharov A.V., Erokhin Yu.V. (2013) Inventory of mineral species of Lipovka ore field. *Vestnik Ural'skogo otdeleniya RMO*, (10), 38-46. (In Russ.)
- Zoloev K.K., Levin V.Ja., Mormilo S.I., Shardokova G.Y. (2004) Mineragenia and deposits of rare metals, molybdenum and tungsten of Urals. Ekaterinburg, IGG UrO RAN; OAO UGSE, 336 p. (In Russ.)