

Научная статья

УДК 550.93:552.321.5/.6(571.52)

doi:10.52349/0869-7892_2026_106_23-35

Изотопно-геохронологические данные по ультрамафитовым и базитовым комплексам Тувы и полихронность циркона: краткий обзор**А. А. Монгуш¹, Ф. П. Леснов², Ч. К. Ойду¹,
Ч. О. Кадыр-оол¹, С. А. Чупикова¹**¹ Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Сибирского отделения Российской академии наук, Кызыл, Россия, amongush@inbox.ru² Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия**Ключевые слова:** U–Pb датирование циркона, генетические типы циркона, геохронометрия, Ar/Ar датировки**Благодарности:** исследование проведено в рамках государственных заданий Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов Сибирского отделения Российской академии наук (№ 1023033100464-7-1.5.1) и Института геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (№ FWZN-2026-0003).**Для цитирования:** Монгуш А. А., Леснов Ф. П., Ойду Ч. К., Кадыр-оол Ч. О., Чупикова С. А. Изотопно-геохронологические данные по ультрамафитовым и базитовым комплексам Тувы и полихронность циркона: краткий обзор // Региональная геология и металлогения. 2026. Т. 33, № 2. С. 23–35. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2026_106_23-35

Аннотация. В статье обобщены опубликованные изотопно-геохронологические данные по ультрамафитовым и базитовым комплексам Тувы, в том числе по ультрамафитам, габброидам, хромититам, базальтовым вулканитам и субвулканитам, а также по генетически связанным с ними породам. В основу обзора легли опубликованные U–Pb данные по циркону (полученные методами LA-ICP-MS, SIMS/SHRIMP, ID-TIMS), а также ⁴⁰Ar/³⁹Ar и K–Ar определения. Их интерпретация дополнена анализом морфологических, микротекстурных, геохимических и изотопных критериев, позволяющих диагностировать генетические типы циркона. Установлено, что совокупность возрастных данных по Туве охватывает интервал от докембрия до палеоген-четвертичного времени и формирует три основных возрастных блока: венд-ордовикский, девон-пермский и палеоген-четвертичный. При этом наиболее представительным является первый из них. Показано, что полихронность циркона в мафит-ультрамафитовых породах Тувы представляет собой устойчивую региональную особенность и в большинстве случаев проявляется на уровне популяций зерен, а не отдельных кристаллов. Обосновано, что U–Pb возраст циркона в основных и ультраосновных породах с низким содержанием этого минерала не может автоматически отождествляться с возрастом кристаллизации породы-хозяина. Надежная интерпретация возможна лишь при четком разграничении магматического, унаследованного, ксеногенного и наложенного циркона, применении комплексного петрогеохронологического подхода и сопоставлении с независимыми геохронометрами.

* Дополнительные материалы к статье доступны по ссылке: https://reggeomet.elpub.ru/jour/manager/files/SupplementaryFiles/2026.T.332106/РГМ_106_Монгуш_цифровое_приложение.pdf

Original article

UDC 550.93:552.321.5/.6(571.52)

doi:10.52349/0869-7892_2026_106_23-35

Isotope and geochronological data on ultramafic and mafic complexes in Tuva (Central Asia) and zircon polychronism: A brief review**A. A. Mongush¹, F. P. Lesnov², Ch. K. Oydup¹,
Ch. O. Kadyr-ool¹, S. A. Chupikova¹**¹ Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources of Siberian Branch of RAS, Kyzyl, Russia, amongush@inbox.ru² V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

© Монгуш А. А., Леснов Ф. П., Ойду Ч. К., Кадыр-оол Ч. О., Чупикова С. А., 2026

Keywords: *U–Pb zircon dating, genetic types of zircon, geochronometry, Ar/Ar dating*

Acknowledgments: the Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources of Siberian Branch of RAS (state geological study no. 1023033100464-7-1.5.1) and V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (state geological study no. FWZN-2026-0003) supported the research.

For citation: Mongush A. A., Lesnov F. P., Oydup Ch. K., Kadyr-ool Ch. O., Chupikova S. A. (2026). Isotope and geochronological data on ultramafic and mafic complexes in Tuva (Central Asia) and zircon polychronism: A brief review. *Regional Geology and Metallogeny*, 33(2), 23–35. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2026_106_23-35

Abstract. The paper synthesizes published isotope and geochronological data on ultramafic and mafic complexes in Tuva, including ultramafite, gabbroid, chromitite, basalt volcanite, subvolcanite, and genetically related rocks. The review is based on published U–Pb zircon data (obtained with LA-ICP-MS, SIMS/SHRIMP, and ID-TIMS), as well as $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K–Ar ages. Their interpretation adds to analyzing the morphological, microtextural, geochemical, and isotope criteria to discriminate between different genetic zircon types. The available geochronological dataset for Tuva spans the interval from the Precambrian to the Paleogene–Quaternary and defines three principal age groupings: Vendian–Ordovician, Devonian–Permian, and Paleogene–Quaternary. The former is the most prominent one. Zircon polychronism in mafic-ultramafic rocks in Tuva proves to be a persistent regional feature and, in most cases, corresponds to zircon populations rather than individual crystals. The results further demonstrate that the U–Pb age of zircon from zircon-poor mafic and ultramafic rocks cannot automatically match the host rock crystallization age. Robust interpretation requires differentiation between igneous, inherited, xenogenic, and overprinted zircon within an integrated petrochronological framework and comparison with independent geochronometers.

** The supplementary data are available at https://reggeomet.elpub.ru/jour/manager/files/SupplementaryFiles/2026.T.332106/PfГМ_106_Монгуш_цифровое_приложение.pdf

ВВЕДЕНИЕ

Изотопное датирование магматических пород и минералов — один из ключевых инструментов современной петрологии и геодинамики. Развитие аналитических методов, прежде всего локальных (U–Pb LA-ICP-MS и SIMS/SHRIMP), существенно расширило возможности U–Pb геохронологии: от интегральных датировок по концентратам исследователи перешли к анализу отдельных зерен и их внутренних зон, что позволило проследить многостадийную историю минералообразования. Центральное место в U–Pb геохронологии магматических систем занял циркон — благодаря высокой устойчивости, способности сохранять первичную изотопную информацию и одновременно фиксировать следы последующих процессов (Corfu et al., 2003; Hancher et al., 2003).

Долгое время U–Pb геохронология циркона применялась главным образом к кремнекислым породам. Считалось, что в ультрамафитах и примитивных мафитовых расплавах циркон (ZrSiO_4) должен быть крайне редким из-за низких средних содержаний Zr и дефицита SiO_2 (Watson et al., 1983). Однако накопленные данные (табл. S1 электронного приложения) свидетельствуют о неравномерном, но систематическом присутствии акцессорного полихронного циркона в ультрамафитовых и базитовых породах различного генезиса — в океанических и островодужных комплексах (как современных, так и древних), а также в континентальных обстановках.

Обзор опубликованных данных по мафит-ультрамафитовым комплексам Тувы позволяет сопоставить региональные возрастные спектры с материалами по аналогичным объектам России и мира. В электронном приложении помещена также и табл. S2, содержащая результаты изотопного датирования минералов и пород ультраосновного, основного, а также генетически связанных с ними пород среднего и кислого состава, установленных

на территории Тувы. В основной части статьи рассматриваются систематика возрастных определений, особенности проявления полихронности циркона и критерии интерпретации его генетических групп.

ПОЛИХРОННОСТЬ ЦИРКОНА

Для достоверной интерпретации полихронности циркона принципиально важна обоснованная генетическая классификация U–Pb данных. Оптимально она достигается посредством комплексной верификации по ряду критериев: микротекстуры и зоны роста (изображения в режиме катодолюминесценции (CL) и обратнорассеянных электронов (BSE)); отношение Th/U; микроэлементный состав, включая редкоземельные элементы (далее — REE); изотопные характеристики (Hf, O); содержание ключевых примесей (Ti, Ca, нерадиогенный Pb); степень метамиктности (нарушения кристаллической структуры вследствие радиационных повреждений); данные рамановской спектроскопии (анализ колебательных мод кристаллической решетки); при необходимости — анализ дифракции обратнорассеянных электронов (EBSD) для выявления деформаций и перекристаллизации циркона (Corfu et al., 2003; Hoskin et al., 2003; Jancher et al., 2003). В мафит-ультрамафитовых породах с низким содержанием циркона интерпретация по единичным «древним» зернам требует особого контроля артефактов, включая лабораторное загрязнение (Костицын и др., 2015; Bjerga et al., 2022).

Дискордантные и кажущиеся «омоложенными» U–Pb определения в первичном цирконе интерпретируются с учетом возможной деформационно обусловленной потери радиогенного Pb. Геохимические исследования циркона из габброидов Срединно-Атлантического хребта демонстрируют, что в процессе кристаллопластических деформаций происходит существенное изменение элементного состава

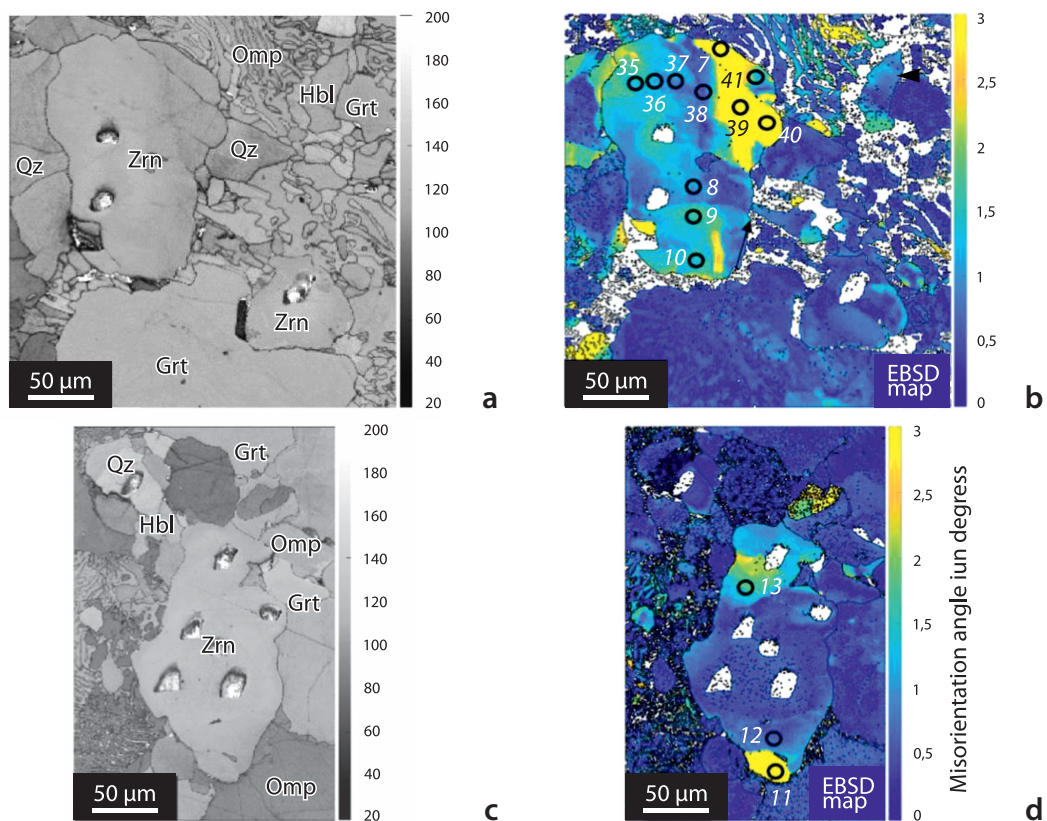


Рис. 1. Влияние кристаллопластических деформаций циркона на его U–Pb систему, в том числе на омоложение U–Pb возраста, на примере зерен из образца эклогита (Гималаи)

a, c — изображения в серых тонах; *b, d* — EBSD карты внутрикристаллической разориентировки, где желтым цветом показаны области микродеформаций с «омоложенным» возрастом; черные кружки — точки NanoSIMS U–Pb анализов (разброс возрастов в пределах зерна на рис. *b* варьирует от 182 до 47 млн лет, на рис. *d* — от 180 до 120 млн лет); белые пустые области в зернах циркона — места HR-SIMS U–Pb анализов

Источник: по Rehman et al. (2023), Rehman (2024)

Fig. 1. Effect of crystal-plastic zircon deformation on its U–Pb system, including U–Pb age resetting, based on eclogite sample grains (Himalayas)

a, c — gray-scale images; *b, d* — EBSD maps of intracrystalline misorientation, where yellow highlights microdeformation areas with “reset” ages; black circles indicate NanoSIMS U–Pb analysis spots (in fig. *b*, the age within the grain ranges from 182 to 47 Ma and from 180 to 120 Ma in fig. *d*); white empty areas within zircon grains mark HR-SIMS U–Pb analysis locations

Source: from Rehman et al. (2023), Rehman (2024)

циркона, сопровождающееся перераспределением U и Th в его структуре (Зингер и др., 2010), что потенциально нарушает целостность изотопных систем минерала. Верификация таких случаев предполагает микротектурный анализ деформаций, прежде всего методом EBSD: дефекты кристаллической решетки — дислокации и низкоугловые границы — могут выступать каналами ускоренного массопереноса и потери Pb, приводя к дискордантности и эффекту «омоложения» (рис. 1) (Piazolo et al., 2016; Rehman, 2024), а в отдельных случаях — «удревнения» (Kovalova et al., 2017). Вполне возможно, что механизм, аналогичный описанному в работе Rehman (2024), обуславливает снижение U–Pb возраста цирконов из ультрамафитовых массивов мантийно-реститовой природы, внедрение которых сопровождалось пластическими деформациями (Леснов и др., 2020; Хлестов и др., 2023).

Интегральные U–Pb определения методом ID-TIMS по концентратам или целым зернам (без привязки

к внутренним зонам) имеют принципиальное ограничение: при гетерогенных популяциях они дают усредненные «смешанные» возраста и могут маскировать присутствие нескольких генераций циркона. Поэтому при анализе полихронности приоритетны *in situ* подходы (LA-ICP-MS, SIMS/SHRIMP), позволяющие датировать отдельные зерна и домены (ядра, каймы) и напрямую сопоставлять возраст с текстурой и химизмом зерен циркона (Понкин и др., 2020; Corfu et al., 2003; Hoskin et al., 2003).

Для циркона из ультрамафит-мафитовых пород характерна генетическая неоднородность, проявляющаяся даже в пределах одной породной ассоциации в виде различий текстурных, геохимических и возрастных характеристик зерен (Bea et al., 2020; Corfu et al., 2003; Geisler et al., 2007; Grimes et al., 2009). Поэтому интерпретация его U–Pb возраста должна опираться не только на изотопные данные, но и на особенности внутреннего строения циркона, его геохимию и общий петрологический контекст.

В рамках данного обзора цирконы подразделяются на четыре типа:

1) магматический (сингенетический) циркон — кристаллизовавшийся непосредственно из расплава породы-хозяина в ходе магматического акта;

2) унаследованный (реликтовый) циркон — присутствовавший в источнике магмы до того магматического события, с которым связано формирование комплекса;

3) ксеногенный циркон — привнесенный из внешнего источника в ходе магматического акта;

4) наложенный (вторичный) циркон — зерна или отдельные домены, сформированные либо существенно преобразованные в результате растворения–переосаждения, перекристаллизации, роста новых участков минерала или частичной потери Pb при флюидно-метасоматических и/или метаморфических процессах.

Магматический циркон. Согласно классическим представлениям, в мафических системах, недосыщенных SiO_2 , более вероятным носителем Zr является бадделеит (ZrO_2), тогда как циркон кристаллизуется преимущественно на поздних стадиях эволюции расплава — в его остаточных микропорциях, обогащенных несовместимыми элементами. Это связано с высокой растворимостью циркона в расплавах основного состава (Аранович и др., 2020; Borisov et al., 2019; Cambeses et al., 2023; Shao et al., 2019; Watson et al., 1983). Позднемагматический циркон, связанный с остаточными обогащенными расплавленными порциями, описан, в частности, в кварцевых долеритах Онежской палеопротерозойской структуры (Карелия) (Степанова и др., 2014) и в кровлевых частях траппов Сибирской платформы (Гусев и др., 2019); по аналогии с ними интерпретируются и некоторые цирконы из Тувы (табл. S2, № 61, 72–74, 92).

Вместе с тем данные по породам океанической коры и результаты численного моделирования показывают, что позднемагматическая кристаллизация циркона в мафитовых системах может реализовываться в разных условиях локализации остаточного расплава. Наряду с образованием в наиболее эволюционировавших остаточных расплавах, циркон может кристаллизоваться и при локальном насыщении межкристаллического пространства в кумулатах: по мере увеличения степени кристалличности остаточный расплав концентрируется в межзерновых промежутках, а рост минералов с низким коэффициентом распределения Zr (например, оливин) способствует накоплению циркония у поверхностей кристаллов и последующей кристаллизации циркона. Этим механизмом объясняется присутствие магматического циркона, в частности, в троктолитах и оливиновых габбро, где он может занимать текстурные позиции, соответствующие межкумуляусной кристаллизации в ранее сформированных породах (Bea et al., 2022; Grimes et al., 2009).

Для примитивных мафитовых и особенно ультрамафитовых расплавов пересыщение по Zr при обычных его концентрациях считается маловероятным, поэтому появление циркона в ультрамафитовых породах целесообразно связывать не с его непосредственной кристаллизацией из первичного

ультраосновного расплава, а с участием более эволюционировавших остаточных расплавных производных (Аранович и др., 2020; Костицын и др., 2015). С этих позиций обнаружение циркона явного синмагматического происхождения в плагиоклазовом верлите Калбакдагского мафит-ультрамафитового массива Тувы (табл. S2, № 73) может быть интерпретировано как результат инфильтрации остаточного расплава в кумулатную массу или в догабброидную ультрамафитовую матрицу (Монгуш и др., 2026), где и происходила кристаллизация циркона.

Унаследованный циркон. Находки такого циркона в ряде ультрамафитовых массивов интерпретируются как признак рециклинга континентальной коры в мантию, хотя в отдельных случаях они могут отражать более широкий комплекс процессов, связанных с субдукционным переносом корового материала и мантийным метасоматозом (Комия, 2011; Сколотнев и др., 2010; Bea et al., 2001; Katayama et al., 2003). Сходный вывод следует из данных Siebel et al. (2009), показавших, что ксенокристы циркона из западной части Эгерского рифта (Чехия) длительно сохранялись в верхней мантии и были вынесены позднее базальтовым магматизмом. Экспериментальные данные Cambeses et al. (2023) демонстрируют, что при ультранизкой степени частичного плавления мантийного источника циркон может длительно сохраняться, если расплав присутствует в виде малых, пространственно ограниченных межзерновых объемов. В этом случае расплав, контактирующий с поверхностью зерна, быстро насыщается Zr, после чего дальнейшее растворение циркона резко замедляется, а сам расплав начинает выполнять экранирующую функцию. Тем самым сохранность унаследованного циркона в мафит-ультрамафитовых системах согласуется с миграцией расплава в режиме пористого потока, в то время как в областях канализированного переноса с высокой долей расплава такие зерна должны быстро растворяться. Этим можно объяснить неравномерное распределение циркона в мантийных породах.

Вместе с тем, хотя физическая сохранность унаследованного циркона в мантийных условиях экспериментально подтверждена, устойчивость его U–Pb изотопной системы остается предметом дискуссии. Это особенно важно для мафит-ультрамафитовых пород, прежде всего мантийных реститов, поскольку при характерных для них температурах следует ожидать эффективного диффузионного переуравновешивания: согласно оценкам, при 1200–1300 °C U–Pb система в зерне циркона размером 200 мкм может полностью омоложиться за сотни — несколько тысяч лет (Костицын и др., 2015).

Ксеногенный циркон. Происхождение этого циркона в мафит-ультрамафитовых системах может быть связано как с ассимиляцией корового материала и захватом циркона из вмещающих пород, так и с более ранним переносом циркона в литосферную мантию или мантийный клин в составе субдукционно-рециклированного вещества (Ферштатер и др., 2009; Aitchison et al., 2022; Bea et al., 2001, 2020; Robinson et al., 2015; Rojas-Agramonte et al., 2017). Вместе с тем ксеногенные зерна нередко испытывают

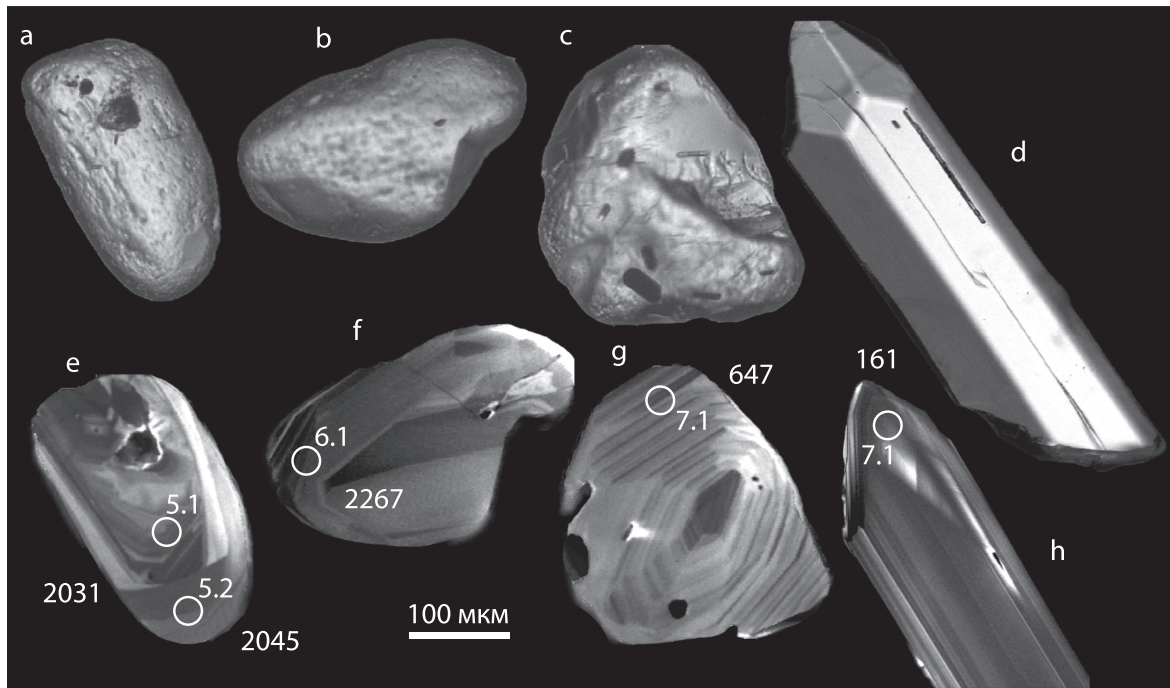


Рис. 2. Зерна циркона из пироксенита (a–c, e–g) и габбродиорита (d, h) Берёзовского офиолитового массива (Сахалин), полученные в режимах оптической съемки на SHRIMP-II (a–d) и катодолуминесценции (e–h)

Для пироксенитовой популяции характерны древние немагматические зерна, в то же время циркон, обнаруженный в габбродиорите, интерпретируется как магматический. Целыми цифрами показан возраст в млн. лет.

Источник: по Леснову и др. (2015)

Fig. 2. Optical (SHRIMP-II) (a–d) and cathodoluminescence images (e–h) of zircon grains from pyroxenite (a–c, e–g) and gabbrodiorite (d, h) in the Berezovka ophiolite complex (Sakhalin)

Zircons from pyroxenite are ancient and non-igneous, while those from gabbrodiorite are of igneous origin. The age is shown in whole numbers, in Ma.

Source: from Lesnov et al. (2015)

растворение–перееосаждение, перекристаллизацию, рост кайм и потерю Pb, поэтому их интерпретация должна основываться на разграничении первичных ксенокристов, переработанных ксеногенных ядер и новообразованных доменов (Ронкин и др., 2020; Kovaleva et al., 2017; Piazzolo et al., 2016; Rehman, 2024).

В этом отношении показателен рис. 2: если по морфолого-текстурным признакам магматический циркон обычно достаточно уверенно отделяется от древних немагматических зерен, то разграничение унаследованного и ксеногенного циркона только по оптическим, BSE- и CL-изображениям нередко затруднено — оба типа могут быть представлены округлыми, резорбированными или внутренне неоднородными зернами.

Следовательно, разграничение унаследованного и ксеногенного циркона в мафит-ультрамафитовых породах должно основываться на совокупности критериев. Для унаследованного циркона ключевым является его предмагматическое присутствие в источнике расплава; в пользу такой интерпретации свидетельствуют *in situ* положение зерен в исходной структуре породы, отсутствие их связи с поздними трещинами, прожилками, реакционно-фильтрационными зонами и каналами расплава, а также степень радиационной поврежденности и отжига, согласующаяся с термической историей породы-хозяина.

Напротив, ксеногенное происхождение более вероятно, если древние зерна пространственно ассоциированы с контактами, ксенолитами, поздними кислыми микропрожилками, интерстициальными расплавленными карманами и другими признаками внешнего привноса; дополнительным аргументом служит совпадение их возрастных спектров, РЗЭ характеристик, Lu-Hf- и O-изотопных данных, а также состава минеральных включений с конкретным внешним источником — вмещающими породами, гранитоидными расплавами, субдукционными осадками или иным коровым субстратом. Таким образом, наиболее надежная диагностика достигается на уровне популяции зерен и их петрологического контекста: унаследованный циркон отражает предмагматическую принадлежность к источнику, тогда как ксеногенный связан с позднейшим механическим, расплавленным или флюидным привносом в уже формирующуюся систему (Aitchison et al., 2022; Belousova et al., 2015; Bjerga et al., 2022; Robinson et al., 2015). Поэтому древние U–Pb возрасты циркона в мантийных породах следует интерпретировать как унаследованные только при наличии согласованных текстурных, термоструктурных, микроэлементных и изотопных признаков; в противном случае такие датировки не могут однозначно рассматриваться как свидетельство унаследованного циркона.

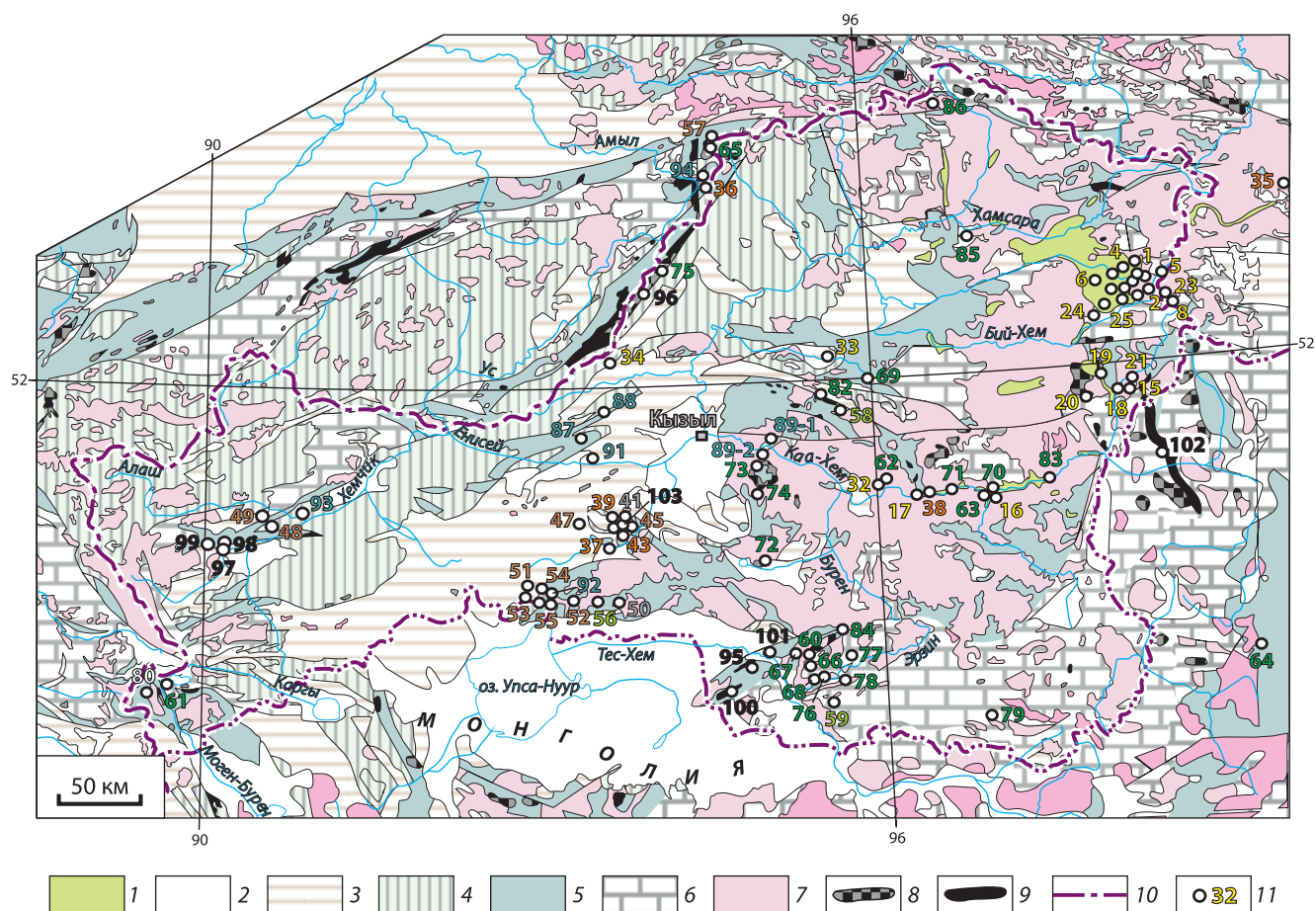


Рис. 3. Схематическая карта Тувы с обозначением объектов, для которых выполнены изотопные датировки минералов и пород

1 — KZ базальты; 2 — MZ–KZ осадочные породы; 3 — D–C вулканогенно-осадочные и осадочные породы; 4 — ϵ_1 –S осадочные породы; 5 — V– ϵ_1 вулканогенно-осадочные породы; 6 — метаморфические породы; 7 — гранитоиды; 8 — габброиды; 9 — ультрамафиты; 10 — административные границы; 11 — номера объектов датирования (см. табл. S1)

Fig. 3. Schematic map of Tuva, with objects with available isotope ages for minerals and rocks indicated

1 — Cenozoic basalt; 2 — Mesozoic–Cenozoic sedimentary rocks; 3 — Devonian–Carboniferous volcanic-sedimentary and sedimentary rocks; 4 — Lower Cambrian–Silurian sedimentary rocks; 5 — Vendian–Lower Cambrian volcanic-sedimentary rocks; 6 — metamorphic rocks; 7 — granitoid; 8 — gabbroid; 9 — ultramafite; 10 — administrative borders; 11 — dating object numbers (refer to Table S1)

Наложенный циркон. В мафит-ультрамафитовых системах этот тип циркона отражает поздние флюидно-метасоматические, метаморфические и деформационные процессы, наложенные на первичную магматическую историю пород. Его образование или переработка обычно связаны с сопряженным растворением-переосаждением исходного циркона, его перекристаллизацией, частичной потерей Pb, а также с ростом новообразованных кайм, пятнистых доменов и микрозерен в прожилках, трещинах и иных зонах повышенной проницаемости при участии Zr-несущих расплавов и флюидов (Geisler et al., 2007; Hay et al., 2009). При *in situ* датировании такие домены и микрозерна могут фиксировать более молодые возрастные этапы, однако их интерпретация как самостоятельных событий оправдана лишь при наличии прямых микротекстурных свидетельств вторичной переработки и согласующихся с ними геохимических признаков (Костицын и др., 2015; Corfu et al., 2003).

Особый случай описан в тумутском офиолитовом комплексе (Австралия), где корово-производные

зерна циркона были занесены в уже сформированные ультрамафиты после их обдукции по микросетям кислого расплава, проникавшего по трещинам и межзерновым каналам. В этом случае древняя цирконовая популяция имеет ксеногенную природу, однако связанное с тем же поздним гранитоидно-флюидным событием частичное растворение-переосаждение, переработка зерен и, вероятно, локальное образование наиболее молодых цирконов и/или их кайм позволяет говорить о присутствии в тумутских офиолитах и наложенного циркона (Belousova et al., 2015).

Формы проявления полихронности циркона и их соотношения. Полихронность циркона в мафит-ультрамафитовых системах проявляется в двух основных формах — популяционной и внутризерновой. Первая выражается в сосуществовании в пределах одной пробы, массива или комплекса зерен, различающихся по возрасту. Вторая связана с присутствием разновозрастных доменов в пределах отдельного кристалла и может считаться установленной только

при наличии прямых микротекстурных и локально-аналитических доказательств. Анализ опубликованных данных (Bjerga et al., 2022; Corfu et al., 2003) показывает, что в мафит-ультрамафитовых системах преобладает популяционная форма полихронности, тогда как внутризерновая фиксируется значительно реже и требует специального обоснования. По-видимому, это связано с тем, что локальные процессы переработки циркона и пространственно ограниченное взаимодействие зерен с расплавом преобладают над формированием устойчивых и широко развитых разновозрастных доменов в пределах одного кристалла (Cambeses et al., 2023; Davies et al., 2021; Geisler et al., 2007). Показательно, что возрастные оценки, полученные методами ID-TIMS и локального анализа для одних и тех же массивов и комплексов Тувы (см. № 66, 72, 77–79, 82, 100 в табл. S2), в целом согласуются между собой. Такое согласование может рассматриваться как косвенное свидетельство того, что в мафит-ультрамафитовых магматических системах различные генетические типы циркона представлены преимущественно отдельными зернами и их популяциями, а не разновозрастными доменами в пределах каждого кристалла.

ИЗОТОПНЫЕ ВОЗРАСТЫ МАССИВОВ ТУВЫ И ПОЛИХРОННОСТЬ ЦИРКОНА

В обзор включены опубликованные изотопно-геохронологические данные по ультрамафитовым и мафитовым массивам Тувы, включая хромититы, габброиды, базальтовые вулканы, субвулканы и туфы основного–среднего состава, а также

по генетически связанным интрузиям среднего и кислого состава, использованным для уточнения времени формирования мафит-ультрамафитовых ассоциаций региона.

Сводные данные приведены в электронном приложении в виде двух таблиц. Табл. S1 обобщает сведения о проявлениях полихронного циркона в породах ультраосновного–основного состава из разных регионов России и мира и задает сравнительный фон для регионального анализа. Табл. S2 содержит результаты изотопного датирования минералов и пород тувинских объектов с указанием местоположения, типов пород, методов анализа, датированных фаз, возрастных оценок и библиографических ссылок; при этом по данным первоисточников в ней выделены возраста магматических минералов, отражающих время формирования породы, унаследованных или ксеногенных минералов, а также наложенных минералов. В совокупности эти материалы показывают, что полихронность циркона проявляется как в отдельных пробах и массивах, так и в масштабе всей мафит-ультрамафитовой провинции Тувы. Пространственное положение объектов изображено на рис. 3; их геологическая позиция, условия отбора проб и аналитические подходы изложены в исходных публикациях и в региональном обобщении (Леснов и др., 2018).

Анализ опубликованных данных показывает, что в Туве наиболее широко применялись U–Pb датирование циркона с преобладанием локальных методов анализа (LA-ICP-MS и SIMS/SHRIMP) и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование минералов. При этом кайнозойские базальты в регионе в основном представлены K–Ar датировками (рис. 4).

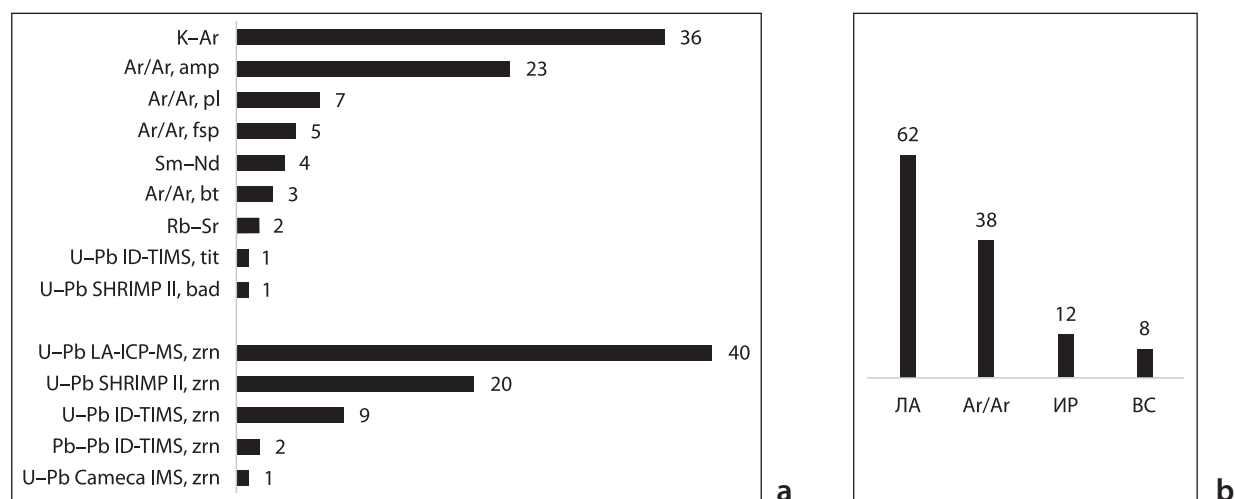


Рис. 4. Распределение числа опубликованных определений изотопного возраста для ультрамафитовых и базитовых комплексов Тувы по примененным аналитическим методам (по данным табл. S1)

a — все определения; *b* — только для докайнозойских объектов. Группы методов: ЛА — локальные U–Pb методы (LA-ICP-MS, SHRIMP/SIMS, Cameca IMS); Ar/Ar — $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ по минералам; ИП — изотопное разбавление (U–Pb ID-TIMS, Pb–Pb ID-TIMS по концентратам); BC — определения по валовому составу (Sm–Nd, Rb–Sr, K–Ar). Числа над столбцами — количество определений

Fig. 4. Distribution of the number of published isotope age determinations for ultramafic and basite complexes of Tuva by analytical method (based on Table S1 data)

a — all determinations; *b* — Precenozoic objects only. Method groups: ЛА — in situ U–Pb methods (LA-ICP-MS, SHRIMP/SIMS, Cameca IMS); Ar/Ar — $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ mineral ages; ИП — isotope dilution (U–Pb ID-TIMS, Pb–Pb ID-TIMS on zircon concentrates); BC — whole-rock methods (Sm–Nd, Rb–Sr, K–Ar). Numbers above the bars indicate the number of determinations

Полученные возрастные данные охватывают интервал от докембрия до палеоген-четвертичного времени, что свидетельствует о многоэтапном характере мантийного магматизма на территории Тувы (рис. 5). Выделяются три основных возрастных блока. Наиболее выраженный максимум приходится на венд–ордовик (V–O). Средне-позднепалеозойский блок (D–P) проявлен значительно слабее. Палеоген-четвертичный блок (Pg–Q) представлен K–Ar датировками базальтов. Указанные блоки соотносятся с ключевыми этапами геодинамической эволюции Тувы как части Алтае-Саянской складчатой области (далее — ACCO) (Берзин и др., 1996): интервал V–O связан с островодужным и аккреционно-коллизийным этапами эволюции ACCO; интервал D–P — с постколлизийными тектоно-магматическими процессами и фазами термофлюидной активизации; интервал Pg–Q — с внутриплитным базальтовым вулканизмом. Эпизодическое присутствие довендских (AR_2 – PR_2) кластеров, установленных по U–Pb датировкам цирконов, вероятно, обусловлено вовлечением древних субстратов в магматические процессы на ранних этапах эволюции ACCO.

В табл. S2 приведены 76 строк U–Pb данных по циркону, каждая из которых отражает отдельный возрастной кластер, выделенный в пределах конкретной породы или, реже, отдельного зерна. В совокупности этот массив данных включает около 930 локальных анализов (100 %), из которых на магматический циркон приходится 46 строк (~621 анализ; 66,8 %), на унаследованные и ксеногенные зерна — 24 строки (~251 анализ; 27,0 %), на наложенные зерна/домены — 6 строк (~58 анализов; 6,2 %). Указанное соотношение генетических типов проявляется как в пределах одного массива, так и нередко в одной пробе.

ОБСУЖДЕНИЕ

Обобщение опубликованных изотопно-геохронологических данных по ультрамафитовым и мафитовым комплексам Тувы показывает, что, несмотря на разнородность аналитических методов и неодинаковую степень изученности отдельных объектов, совокупный материал формирует внутренне согласованную региональную возрастную картину. По данным рис. 4, 5 и табл. S2, в ней отчетливо выделяются три основных временных блока — венд-ордовикский, девонско-пермский и палеоген-четвертичный. Наиболее представлен венд-ордовикский блок, отражающий главный максимум докайнозойских возрастов; девонско-пермские определения распространены существенно слабее, а палеоген-четвертичный блок связан преимущественно с кайнозойским базальтовым вулканизмом. В целом такое распределение возрастов согласуется с основными этапами геодинамической эволюции Тувы как части Алтае-Саянской складчатой области.

Вместе с тем выполненная сводка показывает, что информативность U–Pb данных по циркону в мафит-ультрамафитовых системах определяется не только аналитической точностью, но и прежде всего определением генетической принадлежности датированного минерала. Согласно табл. S2, массив опубликованных U–Pb определений по тувинским объектам включает 76 возрастных кластеров и около 930 локальных анализов. При этом магматический циркон составляет примерно две трети этого массива, унаследованные и ксеногенные зерна — около четверти, а наложенные зерна/домены — свыше 6 %. Следовательно, полихронность циркона для рассматриваемых комплексов не является единичным наблюдением; она представляет собой устойчивую особенность, проявленную как в пределах

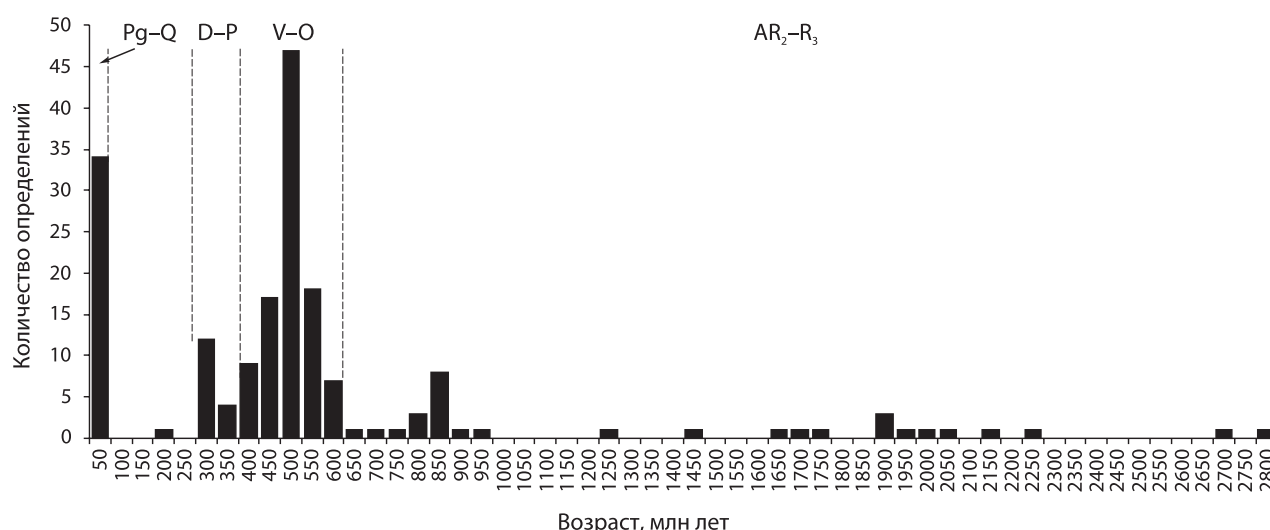


Рис. 5. Сводная гистограмма распределения изотопных возрастов по разным геохронометрам для ультрамафитовых и базитовых комплексов Тувы (по данным табл. S1)

Fig. 5. Integrated bar chart of isotope age distribution for ultramafic and basite complexes of Tuva, based on different geochronometers (from Table S1 data)

отдельных массивов, так и в масштабе региона. При этом разновозрастность чаще фиксируется на уровне популяций зерен, чем в пределах одного кристалла, в связи с этим отдельная U–Pb датировка по циркону из бедных цирконом ультрамафитов и мафитов не может автоматически отождествляться с возрастом кристаллизации породы-хозяина.

Из этого следует, что наиболее надежная интерпретация возраста и генезиса мафит-ультрамафитовых комплексов достижима только при комплексном петрогеохронологическом подходе. Для разграничения магматического, унаследованного, ксеногенного и наложенного циркона локальные U–Pb определения должны рассматриваться совместно с морфологией и внутренним строением зерен, CL/BSE характеристикой, отношениями Th/U, микроэлементными и изотопными данными, а при признаках деформационной переработки — также с EBSD диагностикой и независимыми геохронометрами. В таком сочетании циркон выступает не только как носитель возраста, но и как индикатор стадийности магматического процесса, расплаво-породного взаимодействия, вовлечения древнего вещества и поздней наложенной переработки, что существенно повышает достоверность петрологических и геохимических реконструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совокупность опубликованных изотопных данных по ультрамафитовым и мафитовым комплексам Тувы образует согласованную возрастную систему, в которой выделяются три основных блока: вендордовикский, девонско-пермский и палеоген-четвертичный. Степень детализации данной системы неодинакова: для докайнозойских комплексов ключевыми являются U–Pb датирование циркона и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ данные, для палеоген-четвертичного блока — K–Ar возраста базальтов. Наиболее выраженный максимум докайнозойских возрастов приходится на вендордовикский интервал; девонско-пермские определения имеют подчиненное распространение и отражают более поздние события магматической и постмагматической истории региона.

Полихронность циркона для мафит-ультрамафитовых комплексов Тувы является устойчивой региональной особенностью. В возрастных спектрах закономерно сочетаются магматический, унаследованный, ксеногенный и наложенный компоненты, вследствие чего U–Pb возраст циркона не может без специальной проверки отождествляться с возрастом формирования породы-хозяина.

В большинстве рассмотренных объектов полихронность реализуется на уровне популяций зерен. Поэтому интерпретация разновозрастных спектров должна исходить прежде всего из неоднородности цирконовой популяции; вывод о внутризерновой многостадийности допустим только при наличии прямых микротекстурных данных и датирования отдельных доменов.

Древние, в том числе докембрийские, возрастные кластеры в цирконе из мафит-ультрамафитовых

пород должны рассматриваться как унаследованные или ксеногенные только после подтверждения их связи с породой-хозяином либо внешними факторами на основе независимых минералого-петрологических и геохимических данных.

Надежная возрастная, петрологическая и геодинамическая интерпретация мафит-ультрамафитовых комплексов возможна только в рамках комплексной петрогеохронологии, объединяющей локальное U–Pb датирование циркона с текстурным, геохимическим, изотопным и при необходимости деформационным анализом, а также с сопоставлением результатов независимых геохронометров.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Аранович Л. Я., Бортников Н. С., Борисов А. А. Океанический циркон как петрогенетический индикатор // *Геология и геофизика*. 2020. Т. 61, № 5–6. С. 685–700. <https://doi.org/10.15372/GiG2019187>
- Берзин Н. А., Кунгурцев Л. В. Геодинамическая интерпретация геологических комплексов Алтае-Саянской области // *Геология и геофизика*. 1996. Т. 37, № 1. С. 63–81.
- Гусев Н. И., Сергеева Л. Ю., Строев Т. С., Савельев С. О., Шарипов А. Г., Ларионов А. Н., Скублов С. Г. U–Pb возраст, геохимия и Lu–Hf систематика циркона из интрузивных траппов западной части Тунгусской синеклизы Сибирской платформы // *Региональная геология и металлогения*. 2019. № 79. С. 49–67.
- Зингер Т. Ф., Бортников Н. С., Шарков Е. В., Борисовский С. Е., Антонов А. В. Влияние пластических деформаций в цирконе на его химический состав (на примере габброидов из зоны спрединга Срединно-Атлантического хребта, впадина Маркова, 6° с. ш.) // *Доклады Академии наук*. 2010. Т. 433, № 6. С. 785–791.
- Комия Ц. Континентальный рециклинг или истинный континентальный рост // *Геология и геофизика*. 2011. Т. 52, № 12. С. 1927–1944.
- Костицын Ю. А., Белоусова Е. А., Силантьев С. А., Бортников Н. С., Аносова М. О. Современные проблемы геохимических и U–Pb геохронологических исследований циркона в океанических породах // *Геохимия*. 2015. № 9. С. 771–800. <https://doi.org/10.7868/S0016752515090022>
- Леснов Ф. П., Кужугет К. С., Монгуш А. А., Ойдул Ч. К. Геология, петрология и рудоносность мафит-ультрамафитовых массивов Республики Тыва. Новосибирск : ГЕО, 2019. 350 с.
- Леснов Ф. П., Ойдул Ч. К., Монгуш А. А., Сергеев С. А. Первые данные об U–Pb возрасте цирконов из гарцбургитов и хромититов Агардагского массива (Южная Тува) // *Гео-сферные исследования*. 2020. № 3. С. 60–68. <https://doi.org/10.17223/25421379/16/5>
- Леснов Ф. П., Хлестов В. В., Гальверсен В. Г., Сергеев С. А. Полигенное формирование офиолитовых мафит-ультрамафитовых комплексов: изотопно-геохронологические и геохимические свидетельства по цирконам из пород Березовского массива (о. Сахалин) // *Геология и геофизика*. 2015. Т. 56, № 7. С. 1322–1346. <https://doi.org/10.15372/GiG20150705>
- Монгуш А. А., Кадыр-оол Ч. О., Леснов Ф. П., Ойдул Ч. К. Реакционно-фильтрационная модель формирования ультрамафит-мафитового Мажалыкского массива (Тува) в обстановке коллизии // *Добрецовские чтения: наука из первых рук : материалы междунар. науч. конф. Улан-Удэ : Бурят. гос. ун-т имени Доржи Банзарова*, 2026. С. 171–173.
- Ронкин Ю. Л., Маслов А. В., Синдерн С. U–Pb (ID-TIMS) геохронологический метод и SIMS приемы датирования циркона “*in situ*”: возможности и ограничения // *Литосфера*. 2020. Т. 20, № 3. С. 411–431. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-3-411-431>

- Сколотнев С. Г., Бельтнев В. Е., Лепехина Е. Н., Ипатьева И. С. Молодые и древние цирконы из пород океанической литосферы Центральной Атлантики: геотектонические следствия // *Геотектоника*. 2010. № 6. С. 24–59.
- Степанова А. В., Самсонов А. В., Ларионов А. Н. Заключительный эпизод магматизма среднего палеопротерозоя в Онежской структуре: данные по долеритам Заонежья // *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*. 2014. № 1. С. 3–16.
- Ферштатер Г. Б., Краснобаев А. А., Беа Ф., Монтеро П., Левин В. Я., Холоднов В. В. Изотопно-геохимические особенности и возраст цирконов из дунитов уральских массивов платиноносного типа, петрогенетические следствия // *Петрология*. 2009. Т. 17, № 5. С. 539–558.
- Хлестов В. В., Леснов Ф. П. Геохронологические этапы деформаций ультрамафитов Шаманского массива (Восточное Забайкалье) // *Геосферные исследования*. 2023. № 2. С. 25–32.
- Aitchison J. C., Cluzel D., Ireland T. R., Zhou R., Lian D., Pattias D., Yan Zh., Yang J. Solid-phase transfer into the forearc mantle wedge: Rutile and zircon xenocrysts fingerprint subducting sources // *Earth and Planetary Science Letters*. 2022. Vol. 577. P. 117251. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117251>
- Bea F., Bortnikov N., Cambeses A., Chakraborty S., Molina J. F., Montero P., Morales I., Silantiev S., Zinger T. Zircon crystallization in low-Zr mafic magmas: Possible or impossible? // *Chemical Geology*. 2022. Vol. 602. P. 120898. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120898>
- Bea F., Bortnikov N., Montero P., Zinger T., Sharkov E., Silantiev S., Skolotnev S., Trukhalev A., Molina-Palma J. F. Zircon xenocryst evidence for crustal recycling at the Mid-Atlantic Ridge // *Lithos*. 2020. Vols. 354–355. P. 105361. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105361>
- Bea F., Fershtater G. B., Montero P., Whitehouse M., Levin V. Ya., Scarrow J. H., Austrheim H., Pushkariev E. V. Recycling of continental crust into the mantle as revealed by Kytlym dunite zircons, Ural Mts, Russia // *Terra Nova*. 2001. Vol. 13, no. 6. P. 407–412. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2001.00364.x>
- Belousova E. A., González Jiménez J. M., Graham I., Griffin W. L., O'Reilly S. Y., Pearson N., Martin L., Craven S., Talavera C. The enigma of crustal zircons in upper-mantle rocks: Clues from the Tumut ophiolite, southeast Australia // *Geology*. 2015. Vol. 43, no. 2. P. 119–122. <https://doi.org/10.1130/G36231.1>
- Bjerga A., Stubseid H. H., Pedersen L.-E. R., Pedersen R. B. Radiation damage allows identification of truly inherited zircon // *Communications Earth & Environment*. 2022. Vol. 3. P. 37. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00372-2>
- Borisov A., Aranovich L. Zircon solubility in silicate melts: New experiments and probability of zircon crystallization in deeply evolved basic melts // *Chemical Geology*. 2019. Vol. 510. P. 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.02.019>
- Cambeses A., Chakraborty S., Jöns N., Montero P., Bea F. How does inherited zircon survive in partially molten mantle: Insights on modes of magma transport in the mantle from nanoscale melt-crystal interaction experiments // *Earth and Planetary Science Letters*. 2023. Vol. 601. P. 117911. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117911>
- Corfu F., Hanchar J. M., Hoskin P. W. O., Kinny P. Atlas of zircon textures // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* : Vol. 53, no. 1. Zircon / eds. J. M. Hanchar, P. W. O. Hoskin. Boston : De Gruyter, Inc., 2003. P. 469–500. <https://doi.org/10.2113/0530469>
- Davies J. H. F. L., Marzoli A., Bertrand H., Youbi N., Ernesto M., Greber N. D., Ackerson M., Simpson G., Bouvier A.-S., Baumgartner L., Pettke T., Farina F., Ahrenstedt H. V., Schaltegger U. Zircon petrochronology in large igneous provinces reveals upper crustal contamination processes: New U–Pb ages, Hf and O isotopes, and trace elements from the Central Atlantic magmatic province (CAMP) // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2021. Vol. 176. P. 9. <https://doi.org/10.1007/s00410-020-01765-2>
- Geisler T., Schaltegger U., Tomaschek F. Re-equilibration of zircon in aqueous fluids and melts // *Elements*. 2007. Vol. 3, no. 1. P. 43–50. <https://doi.org/10.2113/gselements.3.1.43>
- Grimes C. B., John B. E., Cheadle M. J., Mazdab F. K., Wooden J. L., Swapp S., Schwartz J. J. On the occurrence, trace element geochemistry, and crystallization history of zircon from in situ ocean lithosphere // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2009. Vol. 158. P. 757–783. <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0409-2>
- Hay D. C., Dempster T. J. Zircon behavior during low-temperature metamorphism // *Journal of Petrology*. 2009. Vol. 50, no. 4. P. 571–589. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp011>
- Hoskin P. W. O., Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* : Vol. 53, no. 1. Zircon / eds. J. M. Hanchar, P. W. O. Hoskin. Boston : De Gruyter, Inc., 2003. P. 27–62. <https://doi.org/10.2113/0530027>
- Katayama I., Muko A., Iizuka T., Maruyama S., Terada K., Tsutsumi Y., Sano Y., Zhang R. Y., Liou J. G. Dating of zircon from Ti-clinohumite-bearing garnet peridotite: Implication for timing of mantle metasomatism // *Geology*. 2003. Vol. 31, no. 8. P. 713–716. <https://doi.org/10.1130/G19525.1>
- Kovalova E., Klötzli U., Habler G., Huet B., Guan Y., Rhee D. The effect of crystal-plastic deformation on isotope and trace element distribution in zircon: Combined BSE, CL, EBSD, FEG-EMP and NanoSIMS study // *Chemical Geology*. 2017. Vol. 450. P. 183–198. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.12.030>
- Piazolo S., La Fontaine A., Trimby P., Harley S., Yang L., Armstrong R., Cairney J. M. Deformation-induced trace element redistribution in zircon revealed using atom probe tomography // *Nature Communications*. 2016. Vol. 7. P. 10490. <https://doi.org/10.1038/ncomms10490>
- Rehman H. U. Zircon internal deformation and its effect on U–Pb geochronology: A case study from the Himalayan high-pressure eclogites // *Minerals*. 2024. Vol. 14, no. 8. P. 742. <https://doi.org/10.3390/min14080742>
- Rehman H. U., Kagoshima T., Takahata N., Sano Yu., Barrou F., Mainprice D., Yamamoto H. Electron backscatter diffraction analysis combined with NanoSIMS U–Pb isotope data reveal intra-grain plastic deformation in zircon and its effects on U–Pb age: Examples from Himalayan eclogites, Pakistan // *European Journal of Mineralogy*. 2023. Vol. 35, no. 6. P. 1079–1090. <https://doi.org/10.5194/ejm-35-1079-2023>
- Reviews in Mineralogy and Geochemistry : Vol. 53, no. 1. Zircon / eds. J. M. Hanchar, P. W. O. Hoskin. Boston : De Gruyter, Inc., 2003. 500 p.
- Robinson P. T., Trumbull R. B., Schmitt A., Yang J.-S., Li J.-W., Zhou M.-F., Erzinger J., Dare S., Xiong F. The origin and significance of crustal minerals in ophiolitic chromitites and peridotites // *Gondwana Research*. 2015. Vol. 27, no. 2. P. 486–506. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.06.003>
- Rojas-Agramonte Y., Williams I. S., Arculus R., Kröner A., García-Casco A., Lázaro C., Buhre S., Wong J., Geng H., Echeverría C. M., Jeffries T., Xie H., Mertz-Kraus R. Ancient xenocrystic zircon in young volcanic rocks of the southern Lesser Antilles island arc // *Lithos*. 2017. Vols. 290–291. P. 228–252. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.08.002>
- Shao T., Xia Y., Ding X., Cai Y., Song M. Zircon saturation in terrestrial basaltic melts and its geological implications // *Solid Earth Sciences*. 2019. Vol. 4, no. 1. P. 27–42. <https://doi.org/10.1016/j.sesci.2018.08.001>
- Siebel W., Schmitt A. K., Danišić M., Chen F., Meier S., Weiß S., Eroğlu S. Prolonged mantle residence of zircon xenocrysts from the western Eger rift // *Nature Geoscience*. 2009. Vol. 2. P. 886–890. <https://doi.org/10.1038/ngeo695>
- Watson E. B., Harrison T. M. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types // *Earth and Planetary Science Letters*. 1983. Vol. 64, no. 2. P. 295–304. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90211-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90211-X)

REFERENCES

- Aranovich L. Ya., Bortnikov N. S., Borisov A. A. (2020). Oceanic zircon as a petrogenetic indicator. *Russian Geology and Geophysics*, 61(5–6), 559–570. <https://doi.org/10.15372/RGG2019187>
- Berzin N. A., Kungurtsev L. V. (1996). Geodynamic interpretation of Altai-Sayan geological complexes. *Russian Geology and Geophysics*, 37(1), 63–81. (In Russ.).
- Gusev N. I., Sergeeva L. Yu., Stroev T. S., Savel'ev S. O., Sharipov A. G., Larionov A. N., Skublov S. G. (2019). U–Pb age, geochemistry and Lu–Hf systematics of zircon from intrusive traps of the western Tunguska Syncline, the Siberian Platform. *Regional Geology and Metallogeny*, (79), 49–67. (In Russ.).
- Zinger T. F., Bortnikov N. S., Sharkov E. V., Borisovskii S. E., Antonov A. V. (2010). Influence of plastic deformations in zircon on its chemical composition: Evidence from gabbroids of the spreading zone of the Mid-Atlantic Ridge, Markov trough, 6° N. *Doklady Earth Sciences*, 433, 1098–1103. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10080234>
- Komiya Ts. (2011). Continental recycling and true continental growth. *Russian Geology and Geophysics*, 52(12), 1516–1529. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.11.001>
- Kostitsyn Y. A., Belousova E. A., Silant'ev S. A., Bortnikov N. S., Anosova M. O. (2015). Modern problems of geochemical and U–Pb geochronological studies of zircon in oceanic rocks. *Geochemistry International*, 53(9), 759–785. <https://doi.org/10.1134/S0016702915090025>
- Lesnov F. P., Kuzhuget K. S., Mongush A. A., Oydup Ch. K. (2019). *Geology, petrology and ore-bearing of mafic-ultramafic massifs in the Republic of Tyva*. Novosibirsk: GEO, 350 p. (In Russ.).
- Lesnov F. P., Oydup Ch. K., Mongush A. A., Sergeev S. A. (2020). First data on U–Pb isotope age of zircons from the harzburgites and chromitites of the Agardaga ultramafite massive (Southern Tuva). *Geosphere Research*, (3), 60–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.17223/25421379/16/5>
- Lesnov F. P., Khlestov V. V., Gal'versen V. G., Sergeev S. A. (2015). Polygenesis of mafic-ultramafic complexes: Isotope-geochronological and geochemical evidence from zircons of the Berezovka massif rocks (Sakhalin Island). *Russian Geology and Geophysics*, 56(7), 1035–1054. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.06.005>
- Mongush A. A., Kadyr-ool Ch. O., Lesnov F. P., Oydup Ch. K. (2026). Reaction-filtration model for the formation of the ultramafic-mafic Mazhalyk massif (Tuva) in a collisional setting. In *Geodynamics and minerageny of Northern Eurasia* (pp. 171–173) [Intern. sci. conf. proc.]. Ulan-Ude: Buryat State Univ. named after D. Banzarov. (In Russ.).
- Ronkin Yu. L., Maslov A. V., Sindern S. (2020). U–Pb (ID-TIMS) geochronological method and “in-situ” SIMS zircon dating: Possibilities and constraints. *Lithosphere (Russia)*, 20(3), 411–431. (In Russ.). <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-3-411-431>
- Skolotnev S. G., Bel'tenev V. E., Lepekhina E. N., Ipat'eva I. S. (2010). Younger and older zircons from rocks of the oceanic lithosphere in the central Atlantic and their geotectonic implications. *Geotectonics*, 44(6), 462–492. <https://doi.org/10.1134/S0016852110060038>
- Stepanova A. V., Samsonov A. V., Larionov A. N. (2014). The final episode of of the Middle Proterozoic magmatism in the Onega structure: Data on from dolerites of Zaonezhye. *Transactions of the Karelian Research Centre of RAS*, (1), 3–16. (In Russ.).
- Fershtater G. B., Krasnobayev A. A., Bea F., Montero P., Levin V. Ya., Kholodnov V. V. (2009). Isotopic-geochemical features and age of zircons in dunites of the platinum-bearing type Uralian massifs: Petrogenetic implications. *Petrology*, 17, 503–520. <https://doi.org/10.1134/S0869591109050051>
- Khlestov V. V., Lesnov F. P. (2023). Geochronological stages of deformations of the ultramafites of the Shaman massif (Eastern Transbaikalian region). *Geosphere Research*, (2), 25–32. (In Russ.).
- Aitchison J. C., Cluzel D., Ireland T. R., Zhou R., Lian D., Patias D., Yan Z., Yang J. (2022). Solid-phase transfer into the forearc mantle wedge: Rutile and zircon xenocrysts fingerprint subducting sources. *Earth and Planetary Science Letters*, 577, 117251. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117251>
- Bea F., Bortnikov N., Cambeses A., Chakraborty S., Molina J. F., Montero P., Morales I., Silantiev S., Zinger T. (2022). Zircon xenocryst crystallization in low-Zr mafic magmas: Possible or impossible? *Chemical Geology*, 602, 120898. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.120898>
- Bea F., Bortnikov N., Montero P., Zinger T., Sharkov E., Silantiev S., Skolotnev S., Trukhalev A., Molina-Palma J. F. (2020). Zircon xenocryst evidence for crustal recycling at the Mid-Atlantic Ridge. *Lithos*, 354–355, 105361. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.105361>
- Bea F., Fershtater G. B., Montero P., Whitehouse M., Levin V. Ya., Scarrow J. H., Austrheim H., Pushkariev E. V. (2001). Recycling of continental crust into the mantle as revealed by Kytlym dunite zircons, Ural Mts, Russia. *Terra Nova*, 13(6), 407–412. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2001.00364.x>
- Belousova E. A., González Jiménez J. M., Graham I., Griffin W. L., O'Reilly S. Y., Pearson N., Martin L., Craven S., Talarverá C. (2015). The enigma of crustal zircons in upper-mantle rocks: Clues from the Tumut ophiolite, southeast Australia. *Geology*, 43(2), 119–122. <https://doi.org/10.1130/G36231.1>
- Bjerga A., Stubseid H. H., Pedersen L.-E. R., Pedersen R. B. (2022). Radiation damage allows identification of truly inherited zircon. *Communications Earth & Environment*, 3, 37. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00372-2>
- Borisov A., Aranovich L. (2019). Zircon solubility in silicate melts: New experiments and probability of zircon crystallization in deeply evolved basic melts. *Chemical Geology*, 510, 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.02.019>
- Cambeses A., Chakraborty S., Jöns N., Montero P., Bea F. (2003). How does inherited zircon survive in partially molten mantle: Insights on modes of magma transport in the mantle from nanoscale melt-crystal interaction experiments. *Earth and Planetary Science Letters*, 601, 117911. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117911>
- Corfu F., Hanchar J. M., Hoskin P. W. O., Kinny P. (2003). Atlas of zircon textures. In Hanchar J. M., Hoskin P. W. O. (Eds.), *Reviews in Mineralogy and Geochemistry: Vol. 53, no. 1. Zircon* (pp. 469–500). Boston: De Gruyter. <https://doi.org/10.2113/0530469>
- Davies J. H. F. L., Marzoli A., Bertrand H., Youbi N., Ernesto M., Greber N. D., Ackerson M., Simpson G., Bouvier A.-S., Baumgartner L. P., Pettke T., Farina F., Ahrenstedt H. V., Schaltegger U. (2021). Zircon petrochronology in large igneous provinces reveals upper crustal contamination processes: New U–Pb ages, Hf and O isotopes and trace elements from the Central Atlantic magmatic province (CAMP). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 176, 9. <https://doi.org/10.1007/s00410-020-01765-2>
- Geisler T., Schaltegger U., Tomaschek F. (2007). Re-equilibration of zircon in aqueous fluids and melts. *Elements*, 3(1), 43–50. <https://doi.org/10.2113/gselements.3.1.43>
- Grimes C. B., John B. E., Cheadle M. J., Mazdab F. K., Wooden J. L., Swapp S., Schwartz J. J. (2009). On the occurrence, trace element geochemistry, and crystallization history of zircon from in situ ocean lithosphere. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158, 757–783. <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0409-2>
- Hay D. C., Dempster T. J. (2009). Zircon behavior during low-temperature metamorphism. *Journal of Petrology*, 50(4), 571–589. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp011>
- Hoskin P. W. O., Schaltegger U. (2003). The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. In Hanchar J. M., Hoskin P. W. O. (Eds.), *Reviews in Mineralogy and Geochemistry: Vol. 53, no. 1. Zircon* (pp. 27–62). <https://doi.org/10.2113/0530027>
- Katayama I., Muko A., Iizuka T., Maruyama S., Terada K., Tsutsumi Y., Sano Y., Zhang R. Y., Liou J. G. (2003). Dating of zircon from Ti-clinohumite-bearing garnet peridotite: Implication for timing of mantle metasomatism. *Geology*, 31(8), 713–716. <https://doi.org/10.1130/G19525.1>

Kovaleva E., Klötzli U., Habler G., Huet B., Guan Y., Rhede D. (2017). The effect of crystal-plastic deformation on isotope and trace element distribution in zircon: Combined BSE, CL, EBSD, FEG-EMPA and NanoSIMS study. *Chemical Geology*, 450, 183–198. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.12.030>

Piazolo S., La Fontaine A., Trimby P., Harley S., Yang L., Armstrong R., Cairney J. M. (2016). Deformation-induced trace element redistribution in zircon revealed using atom probe tomography. *Nature Communications*, 7, 10490. <https://doi.org/10.1038/ncomms10490>

Rehman H. U. (2024). Zircon internal deformation and its effect on U–Pb geochronology: A case study from the Himalayan high-pressure eclogites. *Minerals*, 14(8), 742. <https://doi.org/10.3390/min14080742>

Rehman H. U., Kagoshima T., Takahata N., Sano Y., Barou F., Mainprice D., Yamamoto H. (2023). Electron backscatter diffraction analysis combined with NanoSIMS U–Pb isotope data reveal intra-grain plastic deformation in zircon and its effects on U–Pb age: Examples from Himalayan eclogites, Pakistan. *European Journal of Mineralogy*, 35(6), 1079–1090. <https://doi.org/10.5194/ejm-35-1079-2023>

Hanchar J. M., Hoskin P. W. O. (Eds.). (2003). *Reviews in Mineralogy and Geochemistry: Vol. 53, no. 1. Zircon*. Boston: De Gruyter, 500 p.

Robinson P. T., Trumbull R. B., Schmitt A., Yang J.-S., Li J.-W., Zhou M.-F., Erzinger J., Dare S., Xiong F. (2015). The origin and significance of crustal minerals in ophiolitic chromitites and peridotites. *Gondwana Research*, 27(2), 486–506. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.06.003>

Rojas-Agramonte Y., Williams I. S., Arculus R., Kröner A., García-Casco A., Lázaro C., Buhre S., Wong J., Geng H., Echeverría C. M., Jeffries T., Xie H., Mertz-Kraus R. (2017). Ancient xenocrystic zircon in young volcanic rocks of the southern Lesser Antilles island arc. *Lithos*, 290–291, 228–252. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.08.002>

Shao T., Xia Y., Ding X., Cai Y., Song M. (2019). Zircon saturation in terrestrial basaltic melts and its geological implications. *Solid Earth Sciences*, 4(1), 27–42. <https://doi.org/10.1016/j.sesci.2018.08.001>

Siebel W., Schmitt A. K., Danišić M., Chen F., Meier S., Weiß S., Eroğlu S. (2009). Prolonged mantle residence of zircon xenocrysts from the western Eger rift. *Nature Geoscience*, 2, 886–890. <https://doi.org/10.1038/ngeo695>

Watson E. B., Harrison T. M. (1983). Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2), 295–304. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90211-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90211-X)

Андрей Александрович Монгуш

Кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник

Тувинский институт комплексного освоения
природных ресурсов Сибирского отделения
Российской академии наук, Кызыл, Россия

<https://orcid.org/0000-0002-9299-086X>
Scopus Author ID 6504560973
WoS ResearcherID J-6411-2018
РИНЦ SPIN-код 5568-1816
amongush@inbox.ru

Феликс Петрович Леснов

Доктор геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, Россия

<https://orcid.org/0000-0002-6589-8670>
Scopus Author ID 14624275900
WoS ResearcherID B-3143-2014
РИНЦ SPIN-код 7533-8140
lesnovfp@list.ru

Чойганмаа Кыргысовна Ойду

Кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник

Тувинский институт комплексного освоения
природных ресурсов Сибирского отделения
Российской академии наук, Кызыл, Россия

<https://orcid.org/0000-0002-2141-1445>
Scopus Author ID 35756202900
WoS ResearcherID AAG-2062-2021
РИНЦ SPIN-код 3198-7304
oydup_ch@mail.ru

Andrey A. Mongush

PhD (Geology and Mineralogy),
Leading Researcher

Tuvanian Institute for Exploration
of Natural Resources of Siberian Branch of RAS,
Kyzyl, Russia

<https://orcid.org/0000-0002-9299-086X>
Scopus Author ID 6504560973
WoS ResearcherID J-6411-2018
RSCI SPIN-code 5568-1816
amongush@inbox.ru

Felix P. Lesnov

DSc (Geology and Mineralogy),
Leading Researcher

V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy,
Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia

<https://orcid.org/0000-0002-6589-8670>
Scopus Author ID 14624275900
WoS ResearcherID B-3143-2014
RSCI SPIN-code 7533-8140
lesnovfp@list.ru

Choygangmaa K. Oydup

PhD (Geology and Mineralogy),
Leading Researcher

Tuvanian Institute for Exploration
of Natural Resources of Siberian Branch of RAS,
Kyzyl, Russia

<https://orcid.org/0000-0002-2141-1445>
Scopus Author ID 35756202900
WoS ResearcherID AAG-2062-2021
RSCI SPIN-code 3198-7304
oydup_ch@mail.ru

Чаяна Олекоевна Кадыр-оол

Младший научный сотрудник

Тувинский институт комплексного освоения
природных ресурсов Сибирского отделения
Российской академии наук, Кызыл, Россия

<https://orcid.org/0000-0003-3441-0035>

Scopus Author ID 57200309795

WoS ResearcherID AAG-7969-2021

РИНЦ SPIN-код 6956-8452

kadyrool91@mail.ru

Chayana O. Kadyr-ool

Junior Researcher

Tuvinian Institute for Exploration
of Natural Resources of Siberian Branch of RAS,
Kyzyl, Russia

<https://orcid.org/0000-0003-3441-0035>

Scopus Author ID 57200309795

WoS ResearcherID AAG-7969-2021

RSCI SPIN-code 6956-8452

kadyrool91@mail.ru

Светлана Алексеевна Чупикова

Кандидат географических наук,
старший научный сотрудник

Тувинский институт комплексного освоения
природных ресурсов Сибирского отделения
Российской академии наук, Кызыл, Россия

<https://orcid.org/0000-0002-7904-5847>

Scopus Author ID 57194128480

WoS ResearcherID R-6738-2016

РИНЦ SPIN-код 8367-9071

s_fom@inbox.ru

Svetlana A. Chupikova

PhD (Geography),
Senior Researcher

Tuvinian Institute for Exploration
of Natural Resources of Siberian Branch of RAS,
Kyzyl, Russia

<https://orcid.org/0000-0002-7904-5847>

Scopus Author ID 57194128480

WoS ResearcherID R-6738-2016

RSCI SPIN-code 8367-9071

s_fom@inbox.ru

Вклад авторов: Монгуш А. А. — написание черновика рукописи, разработка методологии, визуализация (подготовка таблиц и рисунков), пересмотр и редактирование рукописи, итоговые выводы.
Леснов Ф. П. — определение концепции, администрирование проекта, руководство исследования, написание черновика рукописи.
Ойдул Ч. К. — работа с данными. Кадыр-оол Ч. О. — работа с данными. Чупикова С. А. — ГИС обеспечение (рис. 3, табл. S2).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: Mongush A. A. — original draft, methodology, visualization (preparation of tables and figures), text revision, final conclusions.
Lesnov F. P. — conceptualization, project administration, supervision, original draft.
Oydup Ch. K. — data curation. Kadyr-ool Ch. O. — data curation. Chupikova S. A. — GIS software (fig. 3, table S2).

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interest.

Статья поступила в редакцию 28.11.2025
Одобрена после рецензирования 13.04.2026
Принята к публикации 23.06.2026

Submitted 28.11.2025
Approved after reviewing 13.04.2026
Accepted for publication 23.06.2026