

УДК 551.24

DOI: 10.24930/1681-9004-2026-26-2-350-371

Раннекембрийский возраст офиолитов Аламбайской зоны и время зарождения Салаирского сектора Кузнецко-Алтайской палеоостроводужной системы (северо-запад Алтае-Саянской складчатой области)

М. А. Фидлер¹, Ф. И. Жимулев¹, А. С. Степанов², А. В. Котляров¹

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, e-mail: fidler@igm.nsc.ru

²State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Collaborative Innovation Center for Exploration of Strategic Mineral Resources, School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Поступила в редакцию 17.04.2025 г., принята к печати 02.07.2025 г.

Объект исследования. Аламбайская офиолитовая зона Салаирского кряжа (северо-запад Алтае-Саянской складчатой области, Центрально-Азиатского складчатого пояса), относящаяся к офиолитам SSZ-типа. **Цель.** Установление возраста формирования магматических пород офиолитовой зоны. Определение возраста заложения палеосубдукционной зоны и соответствующей ей палеоостроводужной системы. **Материалы и методы.** Цирконы из образцов плагиогранитита (54°3'50.44" с. ш., 85°45'0.22" в. д.) и габбро (54° 0'46.67" с. ш., 85°47'3.11" в. д.) Верхне-Аламбайского габбро-гипербазитового массива датированы методом LA-ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7900 в Совместном Инновационном Центре по Разведке Стратегических Минеральных Ресурсов, Школа Земных Ресурсов, Китайский Университет по Наукам о Земле (г. Ухань). **Результаты.** Итоговый возраст циркона из образца плагиогранитов (54°3'50.44" с. ш., 85°45'0.22" в. д.), рассчитанный по 18 анализам с поправкой на нерадиоγενный свинец, составил 532.2 ± 3.9 млн лет (СКВО = 0.84). Итоговый возраст циркона из образца габбро, рассчитанный по 18 анализам с поправкой на нерадиогенный свинец, составил 530.6 ± 2.7 (СКВО = 0.91). **Выводы.** Надсубдукционные офиолиты Аламбайской офиолитовой зоны Салаира имеют раннекембрийский возраст 530 ± 3 млн лет. Время заложения зоны субдукции в данном секторе Палеоазиатского океана можно оценить равным ≈ 535 –540 млн лет. Данный возраст может быть принят как нижнее ограничение времени формирования островодужных вулканических комплексов Салаирского кряжа. Породные комплексы более древнего возраста в пределах Салаира могут представлять собой аккрецированные к кембрийской островной дуге блоки, в этом случае они должны располагаться к юго-западу от Аламбайской офиолитовой зоны. Комплексы вулканической дуги, расположенные восточнее, должны иметь более молодой возраст, что согласуется с имеющимися к настоящему времени данными.

Ключевые слова: офиолиты, Салаирский кряж, циркон, U-Pb геохронология, субдукция, меланж, габбро, плагиограниты, Центрально-Азиатский складчатый пояс

Источник финансирования

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН (FWZN-2026-0018) и при поддержке РФФ (проект № 23-27-00033). Вклад А.С. Степанова поддержан Национальным фондом естественных наук Китая (проект W2432028)

Early Cambrian ophiolites from the Alambay zone and the formation age of the Salair sector of the Kuznetsk–Altai paleo-island arc system (northwestern Altai–Sayan folded area)

Marina A. Fidler¹, Fedor I. Zhimulev¹, Aleksandr S. Stepanov², Alexey V. Kotlyarov¹

Для цитирования: Фидлер М.А., Жимулев Ф.И., Степанов А.С., Котляров А.В. (2026) Раннекембрийский возраст офиолитов Аламбайской зоны и время зарождения Салаирского сектора Кузнецко-Алтайской палеоостроводужной системы (северо-запад Алтае-Саянской складчатой области). *Литосфера*, 26(2), 350-371. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-2-350-371>. EDN: MODMKD

For citation: Fidler M.A., Zhimulev F.I., Stepanov A.S., Kotlyarov A.V. (2026) Early Cambrian ophiolites from the Alambay zone and the formation age of the Salair sector of the Kuznetsk–Altai paleo-island arc system (northwestern Altai–Sayan folded area). *Lithosphere (Russia)*, 26(2), 350-371. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-2-350-371>. EDN: MODMKD

© М.А. Фидлер, Ф.И. Жимулев, А.С. Степанов, А.В. Котляров, 2026

¹V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, 3 Academician Koptyug av., Novosibirsk 630090, Russia,
e-mail: fidler@igm.nsc.ru

²State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources,
Collaborative Innovation Center for Exploration of Strategic Mineral Resources,
School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Received 17.04.2025, accepted 02.07.2025

Research subject. The Alambay ophiolite zone of the Salair Ridge (northwestern Altai–Sayan folded area, Central Asian Orogenic Belt), belonging to SSZ-type ophiolites. **Aim.** Determination of the formation age of magmatic rocks in the ophiolite zone. Establishing the age of the paleo-subduction zone initiation and the associated paleo-island arc system. **Materials and methods.** Zircons from plagiogranite (54°3'50.44" N, 85°45'0.22" E) and gabbro (54°0'46.67" N, 85°47'3.11" E) samples of the Upper Alambay gabbro-hyperbasite massif were dated using LA-ICP-MS on an Agilent 7900 quadrupole mass spectrometer at the Joint Innovation Center for Strategic Mineral Resources Exploration, School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan). **Results.** The weighted mean ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb age of zircons from the plagiogranite sample (based on 18 analyses with common Pb correction) was 532.2 ± 3.9 Ma (MSWD = 0.84). The corresponding age for the gabbro sample was 530.6 ± 2.7 Ma (MSWD = 0.91). **Conclusion.** The suprasubduction ophiolites of the Alambay zone (Salair Ridge) formed in the Early Cambrian (≈530 ± 3 Ma). The subduction initiation in this sector of the Paleo-Asian Ocean can be estimated at ≈535–540 Ma. This age serves as a lower constraint for the formation of island-arc volcanic complexes in the Salair sector. Older rock assemblages in the region may represent accreted blocks to the Cambrian arc, likely located southwest of the Alambay zone. Volcanic arc complexes to the east should be younger, consistent with available data.

Keywords: ophiolites, Salair Ridge, zircon, U–Pb geochronology, subduction, melange, gabbro, plagiogranites, Central Asian Orogenic Belt

Funding information

The study was conducted within the state assignment of IGM SB RAS (No. FWZN-2026-0018) and with the support of the Russian Science Foundation (No. 23-27-00033). The contribution of A.S. Stepanov was supported by the National Natural Science Foundation of China (project No. W2432028)

Acknowledgements

The authors are grateful to Dr. Sc. (Geology and Mineralogy) I.S. Novikov and Cand. Sc. (Geology and Mineralogy) N.S. Tychkov for their assistance in organizing fieldwork studies, and to Cand. Sc. (Engineering) E.S. Zhimuleva for her help in preparing the manuscript.

ВВЕДЕНИЕ

Офиолитовые зоны являются ключевым элементом для реконструкции палеоокеанических этапов истории земной коры складчатых областей, а датирование магматических пород офиолитовых комплексов представляет собой важную задачу при палеотектонических реконструкциях. За последние десятилетия произошло переосмысление обстановки формирования океанической литосферы, фрагменты которой встречаются в складчатых областях континентов, и индикаторного значения офиолитов. Показано, что большая часть офиолитовых зон складчатых областей сложена породами, близкими по геохимическому составу породам островных дуг и преддуговых блоков (Miyashiro, 1973; Pearce et al., 1984; Flower, 2003; Milsom, 2003; Stern et al., 2012; Condie, Stern, 2023; Zhu et al., 2024). Для обозначения офиолитов подобного типа предложен термин “офиолиты SSZ-типа” (supra-subduction zone, надсубдукционные офиолиты) (Pearce et al., 1984), а позднее – “forearc ophiolites” (преддуговые офиолиты) (Milsom, 2003). Офиолитовые зоны данного типа включают базальты преддуговых блоков (fore-arc basalts, FAB), формирующихся

при заложении внутриокеанических зон субдукции (Flower, 2003; Stern et al., 2012; Zhu et al., 2024). По оценкам (Condie, Stern, 2023), преддуговые офиолиты составляют более 90% всех офиолитовых зон Земли. Поэтому многие из офиолитовых зон должны рассматриваться как маркер процессов зарождения субдукции в палеоокеане, а не как индикатор океанического спрединга, возраст же базитовых пород с островодужными характеристиками, встречающихся в субдукционном меланже, должен быть близким ко времени зарождения субдукционной зоны (Zhu et al., 2024).

Формирование складчатых сооружений Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) и, в частности, Алтае-Саянской складчатой области (АССО) связывается с эволюцией Палеоазиатского океана, существовавшего на этой территории в позднем докембрии и палеозое (Зоненшайн, 1976, 1990; Добрецов и др., 1992, 2004, 2005; Берзин и др., 1994; Buslov et al., 2001; Добрецов, 2003; Dobretsov et al., 2004). Для Палеоазиатского океана реконструируется сложное сочетание геодинамических ситуаций, сходных с современным тектоническим строением западной окраины Тихого океана, где в аккреционных комплексах совмеще-

ны магматические породы океанического (базальты СОХ, океанических островов и плато) и надсубдукционного происхождения (Симонов, 1993; Симонов и др., 1994, 2010, 2021, 2024; Добрецов и др., 1992, 2004, 2005; Буслов, Ватанабе, 1996; Куренков и др., 2002; Dobretsov et al., 2004; Сафонова и др., 2008; Скляр и др., 2016). Петролого-геохимические, минералогические и термобарогеохимические исследования также показывают, что большинство офиолитовых ассоциаций АССО маркируют зоны не древних срединно-океанических хребтов, а палеозон спрединга в надсубдукционных обстановках (Куренков и др., 2002; Добрецов и др., 2005; Скляр и др., 2016; Симонов и др., 2024; и мн. др.) В случае Чаган-Узунских (Горный Алтай) и Северо-Саянских (Западный Саян) офиолитов присутствуют признаки магматизма срединно-океанических хребтов (Симонов и др., 2021, 2022, 2024), сменяющегося магматизмом примитивных островных дуг, что в последнее время также рассматривается как характерная особенность магматической эволюции при формировании преддугового блока (Reagan et al., 2019, 2010). Курайские офиолиты в Горном Алтае, офиолиты Чарской зоны в Северо-Восточном Казахстане, Среднетерсинского массива в Кузнецком Алатау, Восточной и Южной Тувы формировались преимущественно в древних надсубдукционных обстановках (Симонов и др., 1994, 1999, 2010, 2020, 2024; Safonova et al., 2017; Belyaev et al., 2017; Kotlyarov et al., 2018; Pfänder et al., 2021). При этом Курайские офиолиты соответствуют примитивной островной дуге с бонинитами; офиолиты Чарской зоны формировались в основании развитой островной дуги; офиолиты Кузнецкого Алатау имеют сложную историю эволюции от развитой островной дуги к началу формирования окраинно-морского бассейна; для офиолитовых комплексов Южной и Восточной Тувы характерен магматизм задуговых бассейнов (Симонов и др., 2024; см. также ссылки в ней).

В пределах АССО получен ряд определений возраста офиолитов при помощи различных методов. Уран-свинцовым датированием циркона из плагиогранитов установлен неопротерозойский возраст (≈ 1020 млн лет) офиолитов Дунжугурского комплекса на Восточном Саяне (Khain et al., 2002), таким же методом определен возраст офиолитов Агардагской зоны (≈ 570 млн лет) в восточной Туве (Pfänder et al., 2002). В западной Туве на основе аргон-аргонового датирования роговой обманки установлен поздневендский возраст (≈ 578 млн лет) офиолитов Шатского массива (Mongush et al., 2011). На основании палеомагнитных, геологических и изотопно-геохронологических данных предполагается венд-раннекембрийский возраст Среднетерсинского офиолитового массива в Кузнецком Алатау (Плотников и др., 2000; Казанский и др., 2003). Еще ряд примеров датирования офиолито-

вых зон содержится в работах (Safonova et al., 2017; Furnes, Safonova, 2019; Zhu et al., 2024) и цитируемых в них публикациях. Широкое распространение раннекембрийских офиолитов надсубдукционного типа в северной части ЦАСП на территории Китая и Монголии показано в работе (Zhu et al., 2024).

Аламабайская офиолитовая зона (АОЗ), являющаяся офиолитовым швом Салаирской складчатой зоны (Салаирский ороген, Салаир), расположена на северо-западе АССО, имеет протяженность более 180 км. Широкое развитие пород с островодужными геохимическими характеристиками позволяет относить АОЗ к надсубдукционным (преддуговым) офиолитам (Жимулев и др., 2025; Котляров и др., 2025), поэтому датирование магматических пород зоны важно для определения времени заложения всего Салаирского сектора Кузнецко-Алтайской палеоостроводужной системы. До настоящего времени в литературе, посвященной АОЗ (Пинус и др., 1958; Коновалова, Прусевич, 1977; Токарев и др., 2002, 2019; Dobretsov et al., 2004; Долгушин и др., 2019; Zhimulev et al., 2021, 2023, 2024; Жимулев и др., 2021), отсутствовали определения возраста магматических пород Аламабайской офиолитовой зоны. Раннекембрийский или венд-кембрийский возраст базит-гипербазитового комплекса зоны принят условно, на основании аналогий и общих представлений о геологии региона (Шокальский и др., 2000; Токарев и др., 2002, 2019а, б; Бабин и др., 2007), и нуждается в обосновании. Установление возраста Аламабайской офиолитовой зоны сделает более обоснованными реконструкции кембрийской истории Палеоазиатского океана.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ САЛАИРА И АЛАМБАЙСКОЙ ЗОНЫ

Салаирский ороген сложен преимущественно кембрийскими палеоостроводужными комплексами, включающими вулканы кислого и основного состава, известняками и вулканомиктовым флишем (Фомичев, Алексеева, 1961; Токарев и др., 2002, 2019а, б; Бабин и др., 2005; Ветрова и др., 2022; Vetrova et al., 2022; Vetrova, Vetrov, 2024)). Несколько вспышек вулканизма на Салаире фиксируется также в ордовике (Сенников и др., 2025), но геодинамическая обстановка ордовикского вулканизма нуждается в обосновании. В палеотектоническом отношении Салаир представляет собой часть Кузнецко-Алтайской палеоостроводужной системы (Зоненшайн и др., 1990; Берзин и др., 1994; Добрецов, 2003; Метелкин, 2012; Буслов и др., 2013; Buslov, 2014, см. также ссылки в этой работе). В плане Салаир имеет форму подковы, обращенной выпуклой стороной на северо-восток в направлении Кузнецкого прогиба (рис. 1). Средняя часть протяженностью около 250 км примерно со-

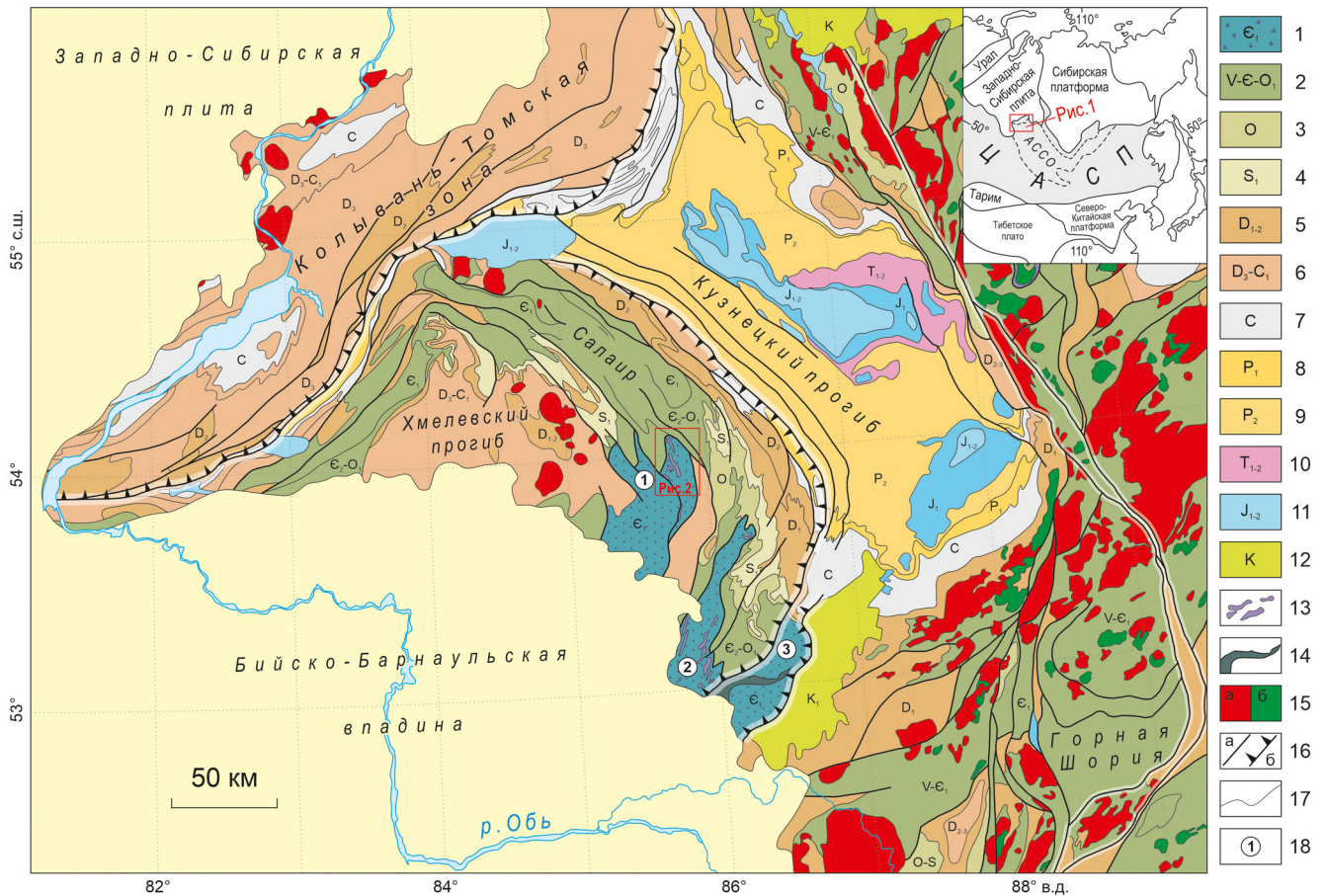


Рис. 1. Геологическая схема Салаирского кряжа, по (Бабин и др., 2005) с упрощениями.

1, 2 – кембрий (?)–раннеордовикские отложения: 1 – субдукционный меланж Аламбайской офиолитовой зоны (шалапский меланж), включающий базальты, кремнистые сланцы, известняки и серпентиниты; 2 – палеоостроводужные комплексы нерасчлененные (риолиты, их туфы, вулканомиктовые песчаники и алевролиты, известняки); 3 – ордовикские отложения, аргиллиты, алевролиты, известняки; 4 – силурийские отложения, аргиллиты, алевролиты, известняки; 5 – девонские известняки, базальты, риолиты и их туфы; 6 – верхнедевонско-нижнекаменноугольные отложения, углеродистые аргиллиты, алевролиты и песчаники; 7–9 – осадочное выполнение позднепалеозойских прогибов: 7 – каменноугольные отложения, песчаники, алевролиты и аргиллиты; 8 – нижнепермские отложения песчаники, алевролиты, угли; 9 – верхнепермские отложения, песчаники, алевролиты; 10 – триасовые отложения, базальты, песчаники; 11 – нижнесреднеюрские отложения наложенных впадин, песчаники, конгломераты, угли; 12 – нижнемеловые отложения, глинистые сланцы и песчаники; 13 – тела серпентинизированных гипербазитов; 14 – амфиболиты ангурепского комплекса; 15 – интрузивные массивы гранитоидные (а), диорит-габбровые(б); 16 – разрывные нарушения (а), фронтальные надвиги Салаира и Кольвань-Томской складчатой зоны (б); 17 – стратиграфические границы; 18 – ареалы субдукционного меланжа: 1 – Тягун-Аламбайский, 2 – Шалапский, 3 – Ангурепский. Врезкой обозначено положение рис. 2.

Fig. 1. Geological scheme of the Salair Ridge, simplified after (Babin et al., 2005).

1, 2 – Cambrian (?)–Early Ordovician deposits: 1 – subduction mélangé of the Alambay ophiolite zone (Shalapsky mélangé), including basalts, siliceous shales, limestones and serpentinites; 2 – undifferentiated paleoisland-arc complexes (rhyolites, their tuffs, volcanic-mictic sandstones and siltstones, limestones); 3 – Ordovician deposits, argillites, siltstones, limestones; 4 – Silurian deposits, argillites, siltstones, limestones; 5 – Devonian limestones, basalts, rhyolites and their tuffs; 6 – Upper Devonian-Lower Carboniferous deposits, carbonaceous mudstones, aleurolites and sandstones; 7–9 – sedimentary filling of late Paleozoic troughs: 7 – Carboniferous deposits, sandstones, siltstones and mudstones; 8 – Lower Permian deposits sandstones, siltstones, coals; 9 – Upper Permian deposits, sandstones, siltstones; 10 – Triassic deposits, basalts, sandstones; 11 – Lower-Middle Jurassic deposits of superimposed basins, sandstones, conglomerates, coals; 12 – Lower Cretaceous deposits, shales and sandstones; 13 – bodies of serpentinitized ultramafic rocks; 14 – amphibolites of the Angurep complex; 15 – intrusive massifs granitoid (a), diorite-gabbro (b); 16 – faults (a), frontal thrusts of Salair and Kolyvan-Tomsk folded zone (b); 17 – stratigraphic boundaries; 18 – Areas of subduction mélangé: 1 – Tyagun-Alambaysky, 2 – Shalapsky, 3 – Angurepsky. The inset shows the position of Fig. 2.

ответствует неотектоническому поднятию Салаирского кряжа, представляющего собой холмистую гряду, обрывающуюся неотектоническим уступом к современной Кузнецкой впадине. По системе чешуйчатых надвигов раннепалеозойские отложения Салаира надвинуты на девонско-пермское осадочное выполнение Кузнецкого прогиба. Силурийские и девонские карбонатно-терригенные мелководно-морские отложения несогласно перекрывают кембрийский вулканический комплекс и образуют осадочный чехол, формировавшийся после завершения островодужного вулканизма и аккреции островных дуг к Сибирскому континенту. Покровная структура Салаира сформирована в пермском периоде в результате коллизии Сибирского, Восточно-Европейского и Казахстанского континентов (Зоненшайн и др., 1990; Buslov et al., 2004) и запечатана позднепермскими полифазными гранитоидными батолитами жерновского комплекса (Росляков и др., 2001).

В расположении кембрийских геологических комплексов наблюдается следующая зональность: лавы и туфы вулканической дуги (печеркинская свита и ее аналоги) приурочены к восточной части Салаира, формируя внешнюю дугу внутри сложнопостроенного Салаирского аллохтона. Вулканомиктовый флиш (зелено-фиолетовая серия и ее аналоги) распространен в западной части Салаира и интерпретируется как фрагмент аккреционной призмы и преддугового прогиба (Добрецов и др., 2004; Dobretsov et al., 2004; Буслов и др., 2013; Жимулев и др., 2025).

Образования АОЗ (Пинус и др., 1958; Коновалова, Прусевич, 1977; Токарев и др., 2002, 2019б; Dobretsov et al., 2004; Долгушин и др., 2019; Жимулев и др., 2021; Zhimulev et al., 2021, 2023; Zhimulev et al., 2024) приурочены к западной, флишевой зоне Салаира. В структуре зоны выделяется три протяженных кулисообразно расположенных ареала. Северный ареал, называемый Тягун-Аламбайским, приурочен к средней части Салаирского кряжа. На южном фланге Салаирского кряжа находятся Шалапский (Мартыново-Шалапский) и Ангурепский ареалы (см. рис. 1). В составе офиолитовой зоны выделены аламбайский базальтовый, верхнеаламбайский дунит-гарцбургитовый и шалапский меланжевый геологические комплексы (Шокальский и др., 2000; Токарев и др., 2019а). Последние исследования подтвердили широкое развитие субдукционных меланжей в строении АОЗ (Жимулев и др., 2025). Преобладающим является терригенный полимиктовый меланж, в подчиненном количестве присутствует серпентинитовый меланж.

Изучение геологического строения и особенностей состава пород АОЗ позволило установить, что в субдукционном меланже зоны тектонически совмещены блоки пород нескольких палеотектонических обстановок. Высокотитанистые базальты и ри-

фовые известняки представляют собой фрагменты симаунта и образуют меланж известняково-базальтового типа по классификации (Wakita, 2015). Марганцевистые и углеродистые микрокварциты являются метаморфизованными кремнистыми океаническими осадками. Габброиды, единичные блоки низкотитанистых базальтов и гранатовые амфиболиты – породы, формировавшиеся в надсубдукционных условиях, представляют собой фрагменты преддугового блока и основания островной дуги (Zhimulev et al., 2024). По данным изучения состава хромшпинелидов из серпентинизированных дунитов и гарцбургитов верхнеаламбайского комплекса, гипербазиты также относятся к надсубдукционным породам (Котляров и др., 2025). Геохимические особенности пород АОЗ позволяют отнести ее к надсубдукционной (SSZ, supra-subduction zone) или преддуговым (fore-arc) офиолитовым комплексам (Жимулев и др., 2025).

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ, МИНЕРАЛЬНЫЙ И ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ОБРАЗЦОВ

Для датирования отобрано несколько образцов из серпентинитового меланжа в северной части Тягун-Аламбайского ареала АОЗ (рис. 2–4). Циркон выделен из лейкократовых плагиогранитов, слагающих жильные тела в верхней части крупного тела габброидов, и из блока габбро в серпентинитовом меланже.

Образец плагиогранита 24-1714 (54°3'50.44" с. ш., 85°45'0.22" в. д.) отобран из северной части Верхне-Аламбайского массива (см. рис. 3). В правом борту долины р. Степной Аламбай наблюдаются коренные выходы базальтов, мелкозернистых габбро и серпентинизированных гипербазитов, составляющие Верхне-Аламбайский массив. Данный массив представляет собой тектонический блок внутри вулканомиктового флиша зелено-фиолетовой серии (см. рис. 2). Образец 24-1714 – плагиогранит. Текстура породы массивная, структура равномернoзернистая, аплитовая, тонкозернистая. В минеральном составе породы приблизительно в равных количествах присутствуют плагиоклаз и кварц (по 45%), калиевый полевой шпат отсутствует. Эпидот (5%) и хлорит (5%) образуют скопления, вероятно, на месте замещенных темноцветных минералов (рис. 5а). Мелкие трещины в породе заполнены также эпидотом и хлоритом. Плагиоклаз представлен зернами с полисинтетическими двойниками, степень сосюритизации от слабой до умеренной. Среди акцессорных минералов в тяжелой фракции наблюдаются единичные мелкие зерна циркона, апатита и магнетита. На диаграмме SiO₂–MALI, по (Frost et al., 2001), состав породы попадает в поле известковистых гранитоидов, для породы характерно экстремально низкое

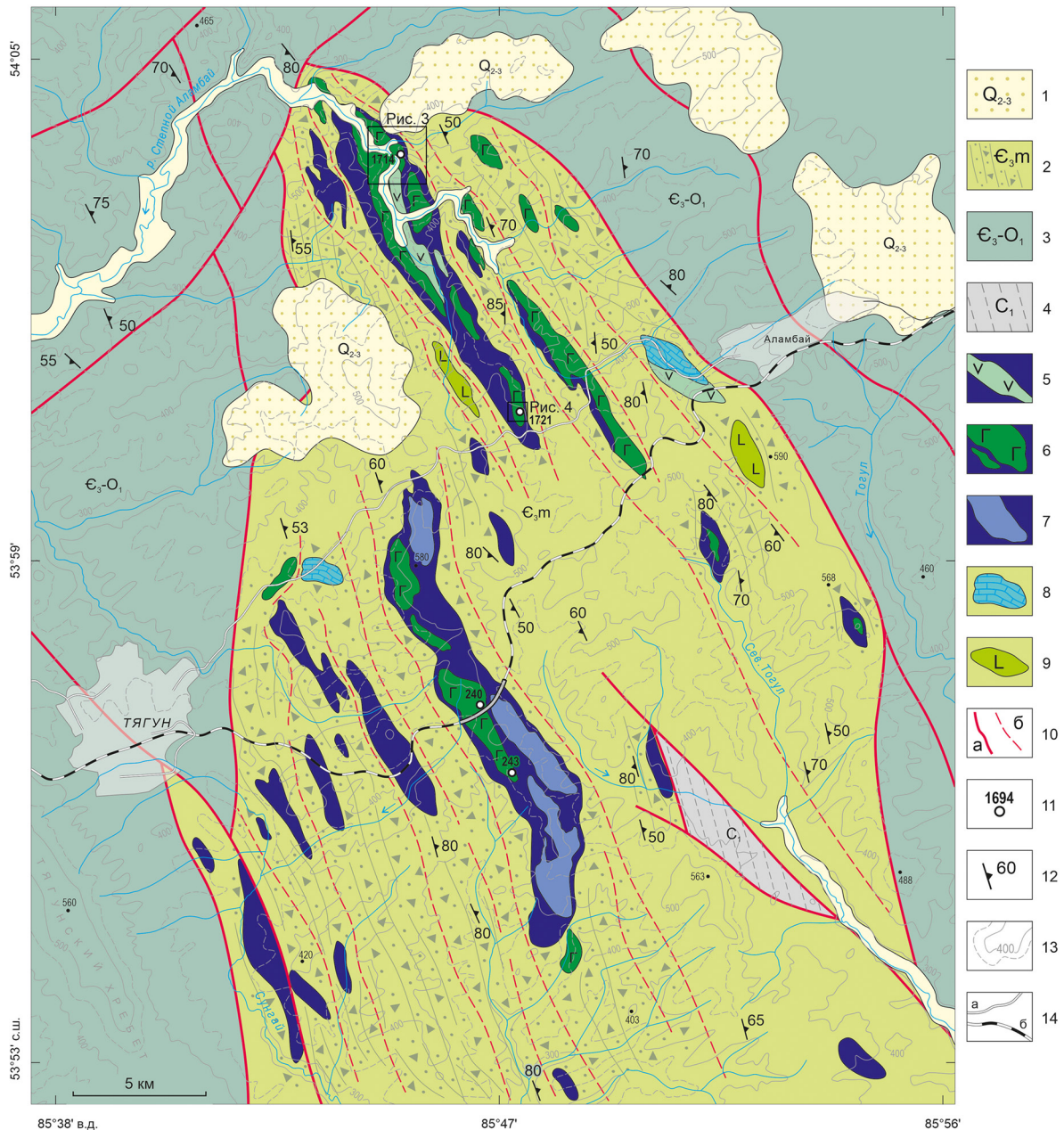


Рис. 2. Схема геологического строения северной части Тягун-Аламбайского ареала АОЗ, по (Жимулев и др., 2025).

1 – четвертичные отложения, лессовидные суглинки; 2 – Шалапский меланж, верхний кембрий; 3 – зелено-фиолетовая серия, верхний кембрий–нижний ордовик, песчаники, алевролиты, аргиллиты, прослои вулканомиктовых конгломератов; 4 – нижнекаменноугольные песчаники и алевролиты; 5–9 – обособления в меланже: 5 – блоки базальтов низкотитанистых (преддуговых, FB), 6 – блоки габбро в серпентинитовом меланже, 7 – серпентинизированные дуниты и перидотиты в серпентинитах, 8 – блоки известняков в меланже, 9 – блоки базальтов высокотитанистых (внутриплитных, OIB); 10 – разрывные нарушения (а) и зоны сланцеватости (б); 11 – точки наблюдения и отбора образцов; 12 – направления и углы падения слоистости и сланцеватости; 13 – изолинии и отметки рельефа; 14 – автомобильная дорога (а) и железная дорога (б).

Fig. 2. Geological map the northern part of the Tyagun-Alambay area of the AOZ, according to (Zhimulev et al., 2025).

1 – Quaternary deposits, loess-like loams, 2 – Shalapsky melange, Upper Cambrian; 3 – green-violet series Upper Cambrian–Lower Ordovician, sandstones, siltstones, argillites, interlayers of volcanic conglomerates; 4 – Lower Carboniferous sandstones and siltstones; 5–9 – segregations in the melange: 5 – blocks of low-Ti basalts (forearc basalts, FB), 6 – blocks of gabbro in serpentinite melange, 7 – serpentinized dunites and peridotites in serpentinites, 8 – blocks of limestones in the melange, 9 – blocks of high-Ti basalts (intraplate, OIB); 10 – faults (a) and foliation zones (b); 11 – observation and sampling points; 12 – directions and angles of dip of bedding and foliation; 13 – isolines and relief marks; 14 – road (a) and railway road (b).

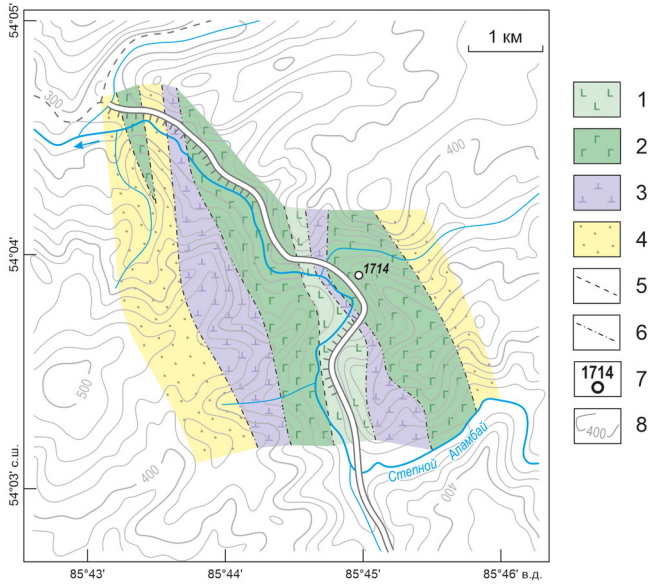


Рис. 3. Геологическая схема участка Верхне-Аламбайского массива и место отбора образца плагиогранитов (1714).

1 – базальты, 2 – габбро, 3 – серпентинизированные дуниты и гарцбургиты, 4 – песчано-алевритистые отложения зелено-фиолетовой серии позднекамбрийско-раннеордовикского возраста; 5 – границы геологических тел; 6 – тектонические границы Верхне-Аламбайского массива; 7 – место отбора образца, 8 – изолинии рельефа и их значения в метрах.

Fig. 3. Geological map of the Upper Alambay massif and the location of plagiogranite sampling (1714).

1 – basalts, 2 – gabbros, 3 – serpentinitized dunites and harzburgites, 4 – sandy-silty deposits of the Green-Violet Group of late Cambrian-early Ordovician age, 5 – boundaries of geological bodies, 6 – tectonic boundaries of the Upper Alambay massif, 7 – sampling location, 8 – relief isolines and their values in meters.

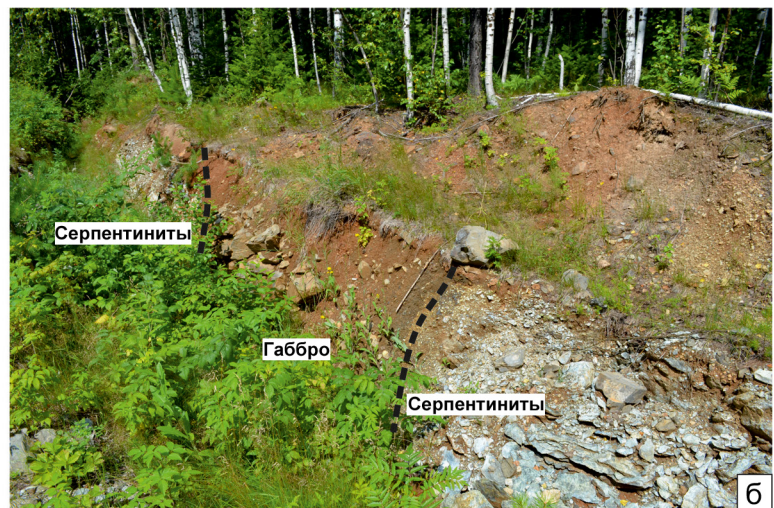
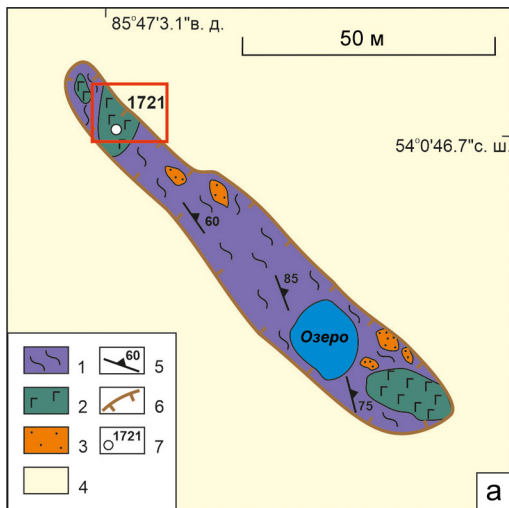


Рис. 4. Участок Верхне-Аламбайского массива и место отбора образца габбро (1721).

а – геологическая схема, б – фотография обнажения. 1 – серпентиниты, 2 – габбро, 3 – микрокварциты, 4 – четвертичные отложения, 5 – направления и углы падения сланцеватости в серпентинитах, 6 – борта карьера, 7 – место отбора обр. 1721. Красным прямоугольником показано положение фрагмента “б”.

Fig. 4. The Upper Alambay massif and the gabbro sample (1721) collection site.

а – geological scheme, б – photograph of the outcrop. 1 – serpentinites, 2 – gabbro, 3 – microquartzites, 4 – Quaternary deposits, 5 – directions and dip angles of schistose in serpentinites, 6 – quarry sides, 7 – sample collection site 1721. The red rectangle shows the position of the fragment “б”.

содержание калия (0.26 мас. %) что позволяет отнести эти породы к океаническим плагиогранитам (Coleman, Peterman, 1975; Maniar, Piccoli, 1989). REE-спектр породы, нормированный по хондриту (Sun, McDonough, 1989), горизонтальный, с положительной европиевой аномалией. На диаграммах соотношений редких элементов (Pearce et al., 1984a) состав породы попадает в поле гранитов вулканических дуг.

Образец 24-1721 (54°0'46.67" с. ш., 85°47'3.11" в. д.) отобран из южной части Верхне-Аламбайского массива (см. рис. 2). В карьерном обнажении вскрыты серпентиниты с включениями блоков микрокварцитов и габброидов (см. рис. 4). Образец 24-1721 является уралитизированным габбро. Текстура породы массивная, структура габбровая, равномернoзернистая, мелко- и среднeзернистая (рис. 5б). В минеральном составе преобладает роговая обман-

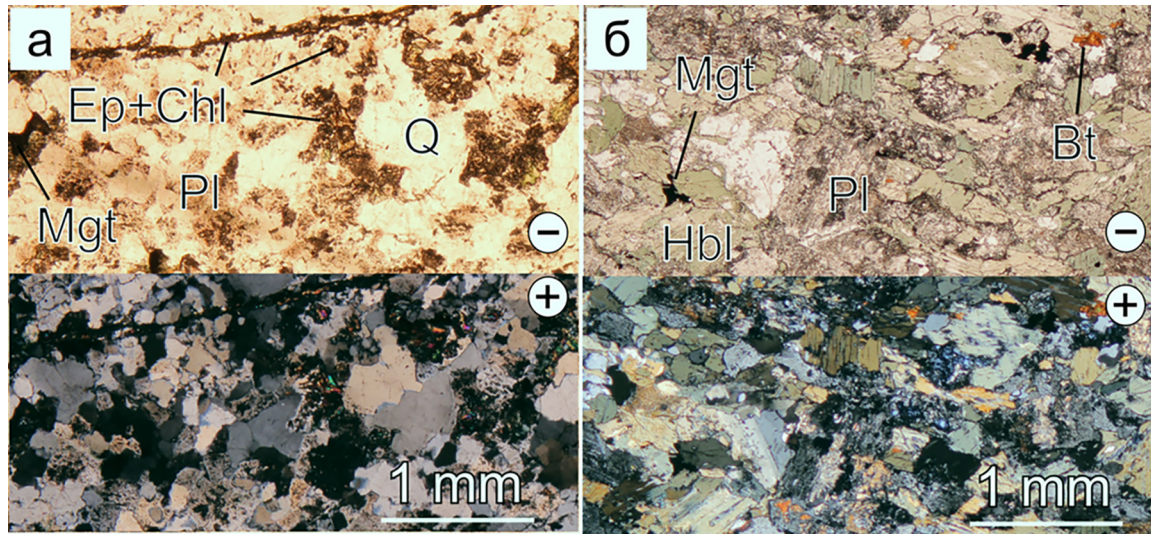


Рис. 5. Микрофотографии пород, отобранных для геохронологического изучения.

а – плагиогранит, обр. 1714; б – габбро, обр. 1721. Сверху фото в параллельных николях, снизу фото в скрещенных николях. *Ep + Chl* – эпидот и хлорит, *Pl* – плагиоклаз, *Q* – кварц, *Hbl* – роговая обманка, *Bt* – биотит, *Mgt* – магнетит.

Fig. 5. Micrographs of rocks selected for geochronological study.

a – plagiogranite, sample 1714; б – gabbro, sample 1721. Above is a photo in parallel nicols, below is a photo in crossed nicols. *Ep + Chl* – epidote and chlorite, *Pl* – plagioclase, *Q* – quartz, *Hbl* – hornblende, *Bt* – biotite, *Mgt* – magnetite.

ка (70%), плеохроирующая в зеленых тонах, которая почти полностью замещает моноклинный пироксен. Реликты пироксена единичные. Местами на краю зерен роговой обманки развит биотит. Плагиоклаз, слагающий 25% породы, почти полностью сосюритизирован. Присутствуют единичные зерна кварца (до 4%). Магнетит (0.5%) образует минеральные скопления неправильной формы. Среди аксессуарных широко развит также апатит (0.5%), а зерна циркона единичны. Геохимический состав габброидов из серпентинитовых меланжей Верхне-Аламбайского и Тогул-Сунгайского массивов описан в работе (Жимулев и др., 2025). Составы габбро характеризуются широким диапазоном содержания кремнезема (SiO_2 – 44–52 мас. %), низкими содержаниями титана (TiO_2 – 0.3–1.2 мас. %), умеренно низкими – магния (MgO – 3.8–7.5 мас. %), стабильным содержанием алюминия (Al_2O_3 – 13.7–15.0 мас. %) и повышенным – натрия (NaO до 5.67 мас. %). Редкоземельные спектры недифференцированные, наблюдаются отрицательные аномалии Th, Nb, Ta, Ti и положительные аномалии K, Ba, U, Sr. На большинстве широко используемых дискриминантных диаграмм составы габбро лежат в полях базальтов океанических островных дуг и эволюционируют вдоль трендов, характерных для островодужных обстановок (Жимулев и др., 2025).

Петрохимический состав анализируемых образцов приведен в табл. 1. Микроэлементный состав обр. 24-1714 приведен в табл. 2.

МЕТОДИКА U-Pb ДАТИРОВАНИЯ ЦИРКОНОВ

Тяжелая немагнитная фракция извлекалась из образцов стандартными методами в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск), включающими дробление в щековой дробилке, выделение на ситах фракции 100–200 мкм, магнитную сепарацию и разделение в тяжелых жидкостях. Зерна циркона выбирались из тяжелой фракции вручную под бинокулярным микроскопом ZEISS Stemi DV4, монтировались в шашки и заливались эпоксидной смолой. Затем шашки были отполированы примерно на половину зерен. Катодолюминесцентные изображения (CL) цирконов получены с помощью сканирующего электронного микроскопа LEO-1430VP (Carl Zeiss, Германия) с системой катодолюминесценции.

Измерения изотопов Pb, U, Th, и состава циркона проводилось в Совместном инновационном центре по разведке стратегических минеральных ресурсов, Школа земных ресурсов, Китайский университет по наукам о Земле (г. Ухань) на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7900, сопряженном с лазерной ячейкой TwoVol3 и лазером с длиной волны 193 нм (NWR 193 HE, New Wave Research). Абляция проводилась в потоке гелия (0.55 л/мин), смешанного с аргоном (0.7 л/мин) с помощью T-образного коннектора. Другие гла-

Таблица 1. Петрохимический состав образцов плагиогранита (24-1714) и габбро (24-1721)**Table 1.** Petrochemical composition of plagiogranite (24-1714) and gabbro (24-1722) samples

Образец	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	BaO	SO ₃	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	NiO	П. п. п.	Сумма
24-1714	75.68	0.21	11.37	3.23	0.04	0.49	1.94	5.29	0.26	0.03	0.01	<0.03	<0.01	<0.01	0.01	0.84	99.41
24-1721	50.29	0.88	15.22	11.62	0.18	4.82	11.04	3.87	0.57	0.08	0.05	0.08	0.04	<0.01	<0.01	1.16	99.89

Таблица 2. Микроэлементный состав образца плагиогранита (24-1714)**Table 2.** Trace elements composition of plagiogranite (24-1714)

Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho
1.80	172	6.6	21	0.42	0.41	56	0.93	2.2	0.34	1.80	0.63	0.61	0.95	0.18	1.21	0.24
Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U									
0.74	0.11	0.75	0.11	0.55	<0.05	0.048	0.15									

живающие сигнал устройства не использовались. Масс-спектрометр был настроен на максимальную чувствительность к тяжелым изотопам путем абляции линий на стекле NIST612. Интенсивность образования оксидов составила <0.3%, а двухзарядных ионов – <0.2%. Диаметр лазерного пучка при абляции 30 мкм, частота лазера 5 Гц. Плотность потока энергии лазера, определенная внешним датчиком, ≈3 Дж/см².

Во время каждого цикла сканирования массы ²⁷Al, ²⁹Si, ³¹P, ⁵⁶Fe, ⁸⁹Y, ⁹¹Zr, ¹⁴⁰Ce, ¹⁴¹Pr, ¹⁴⁶Nd, ¹⁴⁷Sm, ¹⁵³Eu, ¹⁵⁷Gd, ¹⁵⁹Tb, ¹⁶³Dy, ¹⁶⁵Ho, ¹⁶⁶Er, ¹⁶⁹Tm, ¹⁷²Yb, ¹⁷⁵Lu, ¹⁷⁹Hf, ²³⁵U и ²⁰²Hg измерялись в течение 6 мс; ¹³⁹La – в течение 10 мс; ⁴⁹Ti, ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb – в течение 20 мс; ²⁰⁴Pb, ²⁰⁸Pb, ²³⁵U и ²³⁸U – в течение 15 мс. Каждый анализ включал 30 с фонового газа с последующей абляцией 40 с.

Аналитическая сессия включала анализы неизвестных образцов, чередующиеся с парными измерениями стандартов: циркона 91500 (Horstwood et al., 2016), который использовался для первичной калибровки U/Pb и Th/Pb отношений, и стандарта NIST610 (Baker et al., 2004), который использовался для калибровки отношений изотопов Pb. Для оценки систематических погрешностей проводилось измерение вторичных стандартов Temora 418 ± 10 (ожидаемое 416.8 ± 1.1 (Black et al., 2003) и Plesovice 338.6 ± 2.5 (ожидаемое 337.1 ± 0.4 (Sláma et al., 2008)), которое показало хорошую воспроизводимость измерений.

В программе LADR (v. 1.1.07 (Norris, Danyushinsky, 2021)) проведена обработка данных масс-спектрометрии, а именно: определение фона и сигнала анализов, коррекция инструментального дрейфа и расчет изотопных отношений. Построение диаграмм с конкордией и вычисление средневзвешанных значений возраста выполнены в Excel с надстройкой Isoplot (Ludwig, 2012). Погрешности приведены с достоверностью 95%. Редкоэлементный состав вычислен путем нормализации к стопро-

центной сумме оксидов. Концентрация Ti калибровалась по циркону 91500 (Szymanowski et al., 2018).

РЕЗУЛЬТАТЫ ДАТИРОВАНИЯ

Образец 24-1714 (плагиогранит)

Проба представлена обломками кристаллов размером 100–200 мкм, более мелкие зерна потеряны при полировке. На CL изображениях наблюдается ярко выраженная секториальная зональность кристаллов (рис. 6а).

Выполнено 18 анализов (табл. 3). На диаграмме Tera–Wasserburg почти все анализы формируют компактный кластер (рис. 7а). Итоговый возраст, рассчитанный с поправкой на нерадиогенный свинец, составил 532.2 ± 3.9 млн лет (СКВО = 0.84).

Состав цирконов (табл. 4) характеризуется низкими значениями урана (27.5–60 г/т) и тория (3.0–12.5 г/т). Торий-урановое отношение варьируется в диапазоне 0.11–0.22. Содержание гафния 1.0–1.3 мас. % Hf. На диаграммах отношений редких элементов (Grimes et al., 2007) составы цирконов из обр. 24-1714 (плагиогранит) попадают в поле океанической коры, а также в общее поле океанических и континентальных обстановок (рис. 8). В редкоземельном составе наблюдается обогащение тяжелыми REE, спектры имеют положительный наклон с положительной цериевой и слабой отрицательной европиевой аномалией (рис. 9а). Температуры, рассчитанные по содержанию титана в цирконе (Ferry, Watson, 2007), варьируются в пределах от 756 до 845°C.

Образец 24-1721 (габбро)

Цирконы образца крупные, размером до 500 мкм. На CL изображениях наблюдается слабая светимость зерен, слабоконтрастная осцилляторная зональность, в некоторых зернах – минераль-

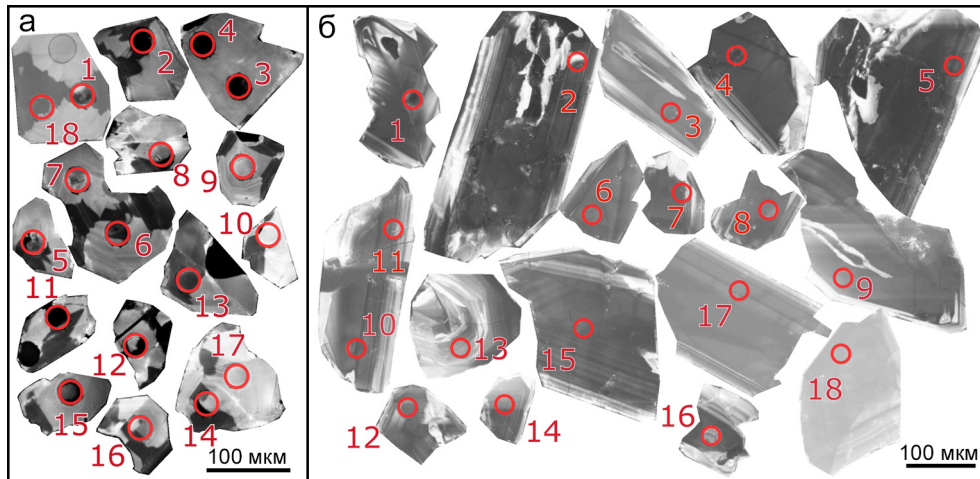


Рис. 6. Катодолуминесцентные фотографии датированных цирконов.
а – обр. 1714, б – обр. 1721. Цифрами обозначены номера точек лазерной абляции.

Fig. 6. Cathodoluminescent photographs of dated zircons.
а – sample 1714, б – 1721. The numbers indicate the laser ablation points.

ные включения и участки гидротермальной переработки (см. рис. 6б). Все анализы сделаны на участках с осцилляторной зональностью или однотонной светимостью.

Выполнено 18 анализов (см. табл. 3). На диаграмме Tera–Wasserburg точки анализов формируют компактный кластер (см. рис. 7б). Итоговый возраст, рассчитанный с поправкой на нерадиоогенный свинец, составил 530.6 ± 2.7 (СКВО = 0.91).

Для цирконов образца характерно высокое содержание урана (315–2041 г/т) и тория (52–1645 г/т). Торий-урановое отношение колеблется от 0.16 до 0.79, что характерно для магматических цирконов. Содержание гафния 0.7–0.9 мас. % Hf. На диаграммах отношений редких элементов (Grimes et al., 2007) составы цирконов из обр. 24–1721 попадают в поле континентальных обстановок (см. рис. 8). Температуры кристаллизации, рассчитанные по содержанию титана в цирконе (Ferry, Watson, 2007), попадают в диапазон от 605 до 716°C.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По двум образцам пород Верхне-Аламбайского массива, отобранным на расстоянии нескольких километров друг от друга, получены одинаковые в пределах аналитической ошибки значения возраста (532 ± 4 млн лет), что соответствует началу раннего кембрия. Каких-либо более молодых или более древних популяций циркона в пробах не выявлено. Данный возраст может быть принят как время кристаллизации габброидов с геохимическими характеристиками надсубдукционных магматических образований и секущих их плагиигранитов.

Полученный возраст хорошо согласуется с представлениями о геологическом строении региона (Шокальский и др., 2000; Бабин и др., 2007). Большая часть оценок возраста островодужных вулканитов и ассоциирующих с ними известняков соответствует раннему кембрию. Датировки 516.0 ± 0.9 и 513.59 ± 1.03 млн лет получены по циркону из туфов, слагающих прослойки в известняках, перекрывающих вулканиты кислого состава островной дуги Салаира (кинтерепская свита) (Vetrova et al., 2022). Аналогичные оценки возраста (519.3 ± 1.9 и 516.0 ± 0.9 млн лет) получены по циркону из лав и туфов, вмещающих колчеданные месторождения Салаирского кряжа (Vetrova, Vetrov, 2024). Это подтверждает представления о раннекембрийском возрасте островодужного магматизма Салаирского орогена. Карбонатные толщи и островодужные вулканиты кислого состава встречаются совместно, образуя единые структуры, при этом часть разрезов представлена чередованием известняков и туфов (Фомичев, Алексеева, 1961; Бабин и др., 2007; Vetrova et al., 2022, Vetrova, Vetrov, 2024), а известняки Салаирского кряжа содержат археоциаты и раннекембрийские трилобиты. По возрасту обломочного циркона из девонских и каменноугольных отложений Колывань-Томской складчатой зоны, формировавшихся за счет размыва Салаирского орогена, время магматической активности Салаира оценивается в диапазоне 560–460 млн лет (пик распределения оценок возраста на 500 млн лет) (Zhimulev et al., 2020), при этом наиболее древние значения возраста могут быть связаны с аккретивными к островной дуге террейнами, формировавшимися в других частях Палеоазиатского океана.

Таблица 3. Результаты U-Pb датирования цирконов из образцов плагиогранита (24-1714) и габбро (24-1721)

Table 3. U-Pb zircon dating results for plagiogranite (24-1714) and gabbro (24-1722)

Номер анализа	Отношения изотопов				Возраст, млн лет				Содержание элементов, г/т			Th/U	T, °C
	²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb	2σ, %	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	2σ, %	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	2σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	2σ	²³² Th	²³⁸ U	⁴⁹ Ti		
Образец 24-1714													
1	11.83	2.4	0.055	7.4	524.4	13.9	430.8	32.1	5.66	41.26	17.5	0.13	804
2	11.50	2.4	0.058	8.9	539.3	14.7	544.4	48.5	4.10	34.40	19.0	0.12	812
3	11.65	2.6	0.060	8.2	533.3	15.1	592.8	48.8	4.81	34.25	19.9	0.14	818
4	11.56	2.7	0.062	8.3	534.8	15.7	661.1	54.7	5.76	43.49	20.7	0.13	822
5	11.63	2.9	0.056	11.2	535.7	17.8	459.1	51.2	3.74	27.45	19.2	0.13	814
6	11.46	2.6	0.060	9.3	541.4	15.8	618.1	57.8	3.91	28.33	16.0	0.14	794
7	11.99	2.4	0.058	9.5	518.0	13.6	538.6	51.2	4.18	32.61	14.9	0.13	787
8	11.85	3.0	0.056	9.6	525.0	17.4	460.2	44.3	4.41	34.84	73.6	0.12	979
9	11.71	2.5	0.057	8.3	530.0	14.8	500.9	41.6	4.48	38.48	15.0	0.11	788
10	11.59	2.7	0.056	9.2	536.9	15.9	453.7	41.9	3.00	27.69	25.6	0.11	845
11	11.74	5.5	0.061	12.7	532.0	32.6	630.0	79.9	4.25	37.41	10.9	0.11	756
12	11.15	4.6	0.064	11.6	555.8	27.3	727.6	84.2	6.41	42.74	21.5	0.15	826
13	11.58	2.8	0.059	6.6	536.7	16.4	554.1	36.5	8.94	59.55	11.2	0.15	759
14	11.54	3.3	0.056	8.9	536.0	18.8	470.2	41.8	12.58	54.95	18.3	0.22	808
15	11.69	3.0	0.058	7.0	533.6	16.8	538.1	37.6	6.58	55.63	12.6	0.12	771
16	11.91	3.2	0.055	6.4	525.5	17.1	424.8	27.2	7.85	60.08	15.4	0.13	791
17	11.57	2.9	0.061	7.7	539.7	17.4	624.1	47.8	6.46	36.22	17.7	0.17	805
18	11.76	2.6	0.078	37.3	528.7	15.1	1155.5	430.9	6.34	48.65	12.0	0.13	765
Образец 24-1721													
1	11.61	2.2	0.058	2.6	531.8	12.1	529.5	13.9	123.46	526.52	2.1	0.23	620
2	11.56	2.5	0.058	2.6	534.2	13.6	534.8	14.0	386.84	885.47	4.1	0.43	670
3	11.39	2.3	0.058	2.0	542.1	12.6	511.1	10.4	570.13	1172.16	3.6	0.48	660
4	11.60	2.0	0.059	2.2	532.2	10.7	549.4	12.0	654.25	1183.71	3.2	0.54	651
5	11.71	2.2	0.058	2.1	528.2	12.4	530.7	11.0	305.57	1013.12	2.8	0.30	640
6	11.58	2.0	0.058	2.2	532.9	11.5	520.0	11.7	399.61	976.47	2.5	0.40	631
7	11.91	5.6	0.060	4.3	526.5	33.3	606.0	26.2	229.61	923.97	3.1	0.24	647
8	11.64	2.2	0.058	2.5	526.2	13.4	535.9	13.6	667.07	1352.93	4.7	0.48	682
9	11.88	2.1	0.059	2.2	520.0	11.6	563.5	12.5	706.87	1350.05	5.2	0.51	690
10	11.77	2.3	0.059	2.3	525.9	12.6	556.8	12.5	221.63	883.70	2.6	0.25	636
11	11.75	2.5	0.058	2.8	527.7	13.2	520.5	14.7	118.40	505.31	3.0	0.23	645
12	11.63	1.9	0.058	2.5	530.7	11.3	516.0	12.7	138.26	497.82	1.7	0.27	605
13	11.54	2.0	0.060	5.1	534.8	11.0	596.2	30.4	52.92	315.05	1.9	0.16	610
14	11.63	2.2	0.058	2.2	531.9	12.4	546.9	11.9	265.66	1006.93	3.2	0.26	652
15	11.53	1.8	0.058	2.0	534.6	10.4	511.6	10.1	224.40	846.73	3.2	0.26	651
16	11.83	1.9	0.058	2.1	521.6	10.4	531.8	11.3	684.42	1149.10	3.9	0.58	667
17	11.56	2.0	0.058	2.2	533.5	11.4	526.4	11.4	195.64	818.23	3.1	0.23	649
18	11.54	2.2	0.058	1.8	535.8	12.1	513.8	9.1	1644.93	2040.97	7.0	0.79	716

В настоящее время большинство исследователей полагают, что в офиолитовых комплексах сохраняются преимущественно образования преддуговых блоков, формирующихся на самых ранних стадиях образования внутриокеанических субдукционных зон (Miyashiro, 1973; Pearce et al., 1984a, б; Flower, 2003; Milsom, 2003; Stern et al., 2012; Condie, Stern, 2023; Zhu et al., 2024). Промежуток времени между началом поддвига одной литосферной плиты под другую вдоль новообразованной границы и появлением пород с геохимическими характеристиками надсубдукционных образований оценивается для современной Идзу-Бонинско-Марианской островной дуги приблизительно

как 7 млн лет (Reagan et al., 2010; Stern et al., 2012). Таким образом, если датированы породы офиолитовой ассоциации с геохимическими характеристиками, близкими к N-MORB, то полученный возраст может интерпретироваться как время разрыва океанической литосферы и начала процесса субдукции. Если же датированы породы с геохимическими особенностями надсубдукционной обстановки, то само заложение субдукционной зоны произошло на несколько миллионов лет раньше, так как появление надсубдукционных пород свидетельствует, что край погружающейся плиты уже достиг области дегидратации, что инициировало процессы частичного плавления в мантийном клине. Это позво-

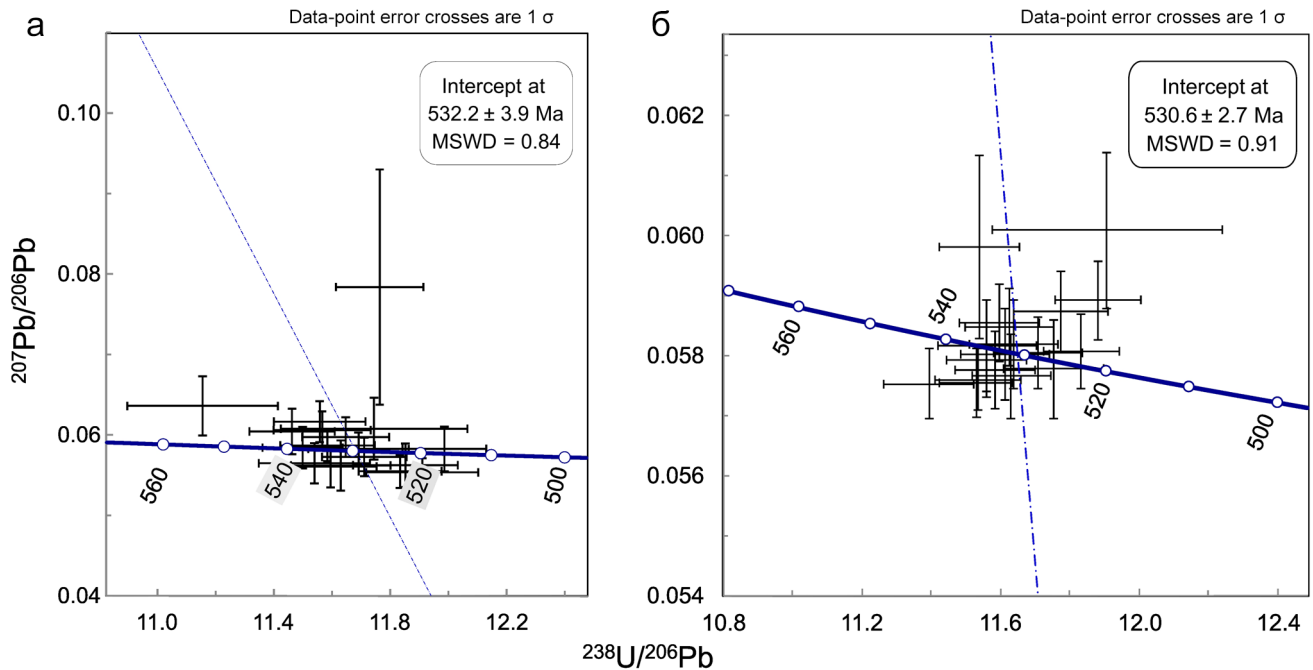


Рис. 7. Диаграмма Тера–Вассербурга для анализов циркона.

а – обр. 1714, б – обр. 1721.

Fig. 7. Thera-Wasserburg diagram for zircon analyses.

а – sample 1714, б – sample 1721.

ляет оценить время заложения Салаирского сектора конвергентной границы плит в Палеоазиатском океане в 535–540 млн лет.

Габброиды и плагиограниты Верхне-Аламбайского габбро-гипербазитового массива имеют плоские спектры распределения редкоземельных элементов, что указывает на комагматичность породной ассоциации. Редкоземельный спектр плагиогранитов характеризуется положительной европиевой аномалией, отсутствующей в спектрах габбро. Положительная европиевая аномалия в породах кислого состава встречается обычно в сильно-деплетированных редкими элементами породах, формирующихся в восстановительной обстановке, в тектонических условиях растяжения (Терехов, 2004), что согласуется с режимом разрыва океанической литосферы, при зарождении зоны субдукции и формировании преддугового блока. Европиевый максимум, являющийся аномальным для большинства кислых пород континентальной коры, нередко встречается в плагиогранитах офиолитовых комплексов (см., например, (Pedersen, Malpas, 1984; Torabi et al., 2019)).

Редкоземельные спектры циркона имеют положительный наклон с обогащением тяжелыми REE и ярко выраженной положительной цериевой аномалией (см. рис. 9). Наличие положительной цериевой аномалией характерно для цирконов, кристал-

лизовавшихся из магм с повышенной фугитивностью кислорода (Ballard et al., 2002), что свойственно надсубдукционным обстановкам. Температуры 750–850°C, полученные по содержанию титана в цирконе из плагиогранита, типичны для гранитов. Более низкие температуры (605–715°C), полученные по содержанию титана в цирконе из габбро, вероятно, отражают низкую активность титана и кристаллизацию циркона из остаточного межзернового расплава. На диаграммах отношений редких элементов (Grimes et al., 2007) составы цирконов из габбро попадают в поле континентальных обстановок (см. рис. 8), а из гранита – в поле океанических обстановок. Такой, несколько неожиданный, результат может отражать фракционирование редких элементов при кристаллизации габбро и образовании гранита.

Офиолиты Салаира моложе офиолитов Восточного Саяна (~1020 млн лет (Khain et al., 2002)), Восточной Тувы (570 млн лет (Pfänder et al., 2002)), Западной Тувы (~578 млн лет (Mongush et al., 2011)) и Куртушубинского хребта Западного Саяна (569 ± 6 млн лет (Mongush et al., 2025)). Они примерно одновозрастны офиолитам (~ранний кембрий (Казанский и др., 2003; Метелкин, 2012)) и островодужным плагиогранитам (530 ± 5 млн лет (Rudnev et al., 2008)) Кузнецкого Алатау. По цирконам из габбро-долеритов Кабак-Тайгинского офиолито-

Таблица 4. Содержание редких элементов в цирконе образцов плагиогранита (24-1714) и габбро (24-1721)
Table 4. REE concentrations in zircon from plagiogranite (24-1714) and gabbro (24-1722)

Номер анализа	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Hf
Образец 24-1714																
1	0.01	1.16	0.06	1.27	3.85	1.65	28.61	10.05	134.12	50.77	239.69	49.30	478.62	110.68	2341.07	11688.88
2	0.00	1.01	0.05	1.17	3.18	1.73	25.03	8.61	112.82	42.11	201.22	41.16	413.54	98.34	1937.38	11911.11
3	0.00	1.21	0.03	0.61	1.93	0.74	14.71	5.56	76.49	30.42	152.78	32.44	327.68	74.64	1438.83	11608.86
4	<0.002	1.28	0.02	0.65	2.02	0.75	15.60	5.92	80.33	32.70	161.27	35.63	362.20	82.15	1531.38	11612.18
5	0.00	1.13	0.03	0.79	2.35	0.94	18.01	6.28	86.02	33.62	162.97	33.72	325.17	71.29	1566.77	11915.06
6	0.01	1.07	0.04	0.70	2.40	1.03	19.18	6.79	92.30	36.04	175.50	36.40	352.92	78.51	1674.90	11563.62
7	0.00	1.34	0.02	0.47	1.64	0.64	14.05	5.27	73.38	29.98	146.57	31.11	304.35	67.76	1376.39	11642.59
8	0.00	1.18	0.01	0.59	2.03	0.67	14.41	5.57	72.74	29.50	146.32	30.99	314.77	69.97	1369.48	12116.20
9	0.00	1.39	0.02	0.32	1.40	0.48	11.73	4.47	65.06	26.20	134.87	28.91	295.22	65.33	1227.72	11862.29
10	<0.003	0.75	0.03	0.59	1.73	0.99	13.34	4.79	65.66	25.65	125.53	26.83	280.18	65.10	1170.83	11313.84
11	<0.003	1.91	0.02	0.56	1.53	0.59	13.91	5.12	73.68	28.78	146.28	30.23	296.97	56.60	1313.55	11418.40
12	0.01	1.17	0.05	1.06	2.89	1.31	21.42	7.37	97.24	36.87	179.79	37.15	383.82	84.28	1658.09	11999.53
13	0.01	2.11	0.10	1.89	5.08	1.63	38.99	13.97	185.25	72.90	345.72	69.78	640.37	126.95	3343.31	11040.43
14	<0.003	1.28	0.07	1.55	4.39	2.33	33.81	11.64	156.22	59.21	289.29	60.31	628.50	142.37	2743.17	11550.21
15	<0.003	1.40	0.01	0.25	1.05	0.49	10.32	4.04	58.73	23.85	119.34	26.80	277.54	61.75	1099.80	13323.22
16	0.36	3.25	0.25	2.39	3.55	1.10	25.25	9.34	130.64	51.62	254.64	54.25	510.81	103.65	2388.75	10823.00
17	0.00	1.10	0.03	0.48	1.73	0.87	14.10	5.13	72.72	28.74	141.70	31.68	334.67	78.63	1306.26	11609.90
18	0.00	1.35	0.08	1.34	3.88	1.51	31.63	11.09	148.89	56.92	269.28	54.64	522.11	117.30	2568.96	11922.13
Образец 24-1721																
1	<0.003	2.93	0.02	0.35	0.96	0.74	8.55	3.61	58.33	27.78	164.07	40.50	452.34	118.79	1443.68	6835.09
2	0.02	7.82	0.03	0.64	2.46	2.09	26.35	10.23	143.68	60.42	321.99	71.85	745.90	181.03	3065.02	7450.62
3	0.14	12.77	0.51	6.18	10.04	6.71	59.87	18.73	238.37	90.25	435.65	93.70	933.26	209.08	4376.39	7366.82
4	0.09	15.35	0.47	6.53	11.96	7.38	69.21	22.06	286.14	108.12	530.07	115.00	1153.34	254.42	5223.55	7129.97
5	0.02	5.88	0.05	0.60	2.05	1.38	17.02	7.23	112.55	53.55	305.91	72.25	802.77	201.36	2802.82	7065.49
6	0.08	6.87	0.20	2.53	5.54	4.05	36.23	12.48	166.69	66.50	341.19	76.43	794.34	187.17	3227.51	7219.98
7	0.17	5.78	0.11	1.76	2.81	2.14	19.72	7.63	110.94	48.17	282.68	69.23	796.36	205.59	2484.77	7584.49
8	0.51	13.30	0.39	5.09	8.60	5.69	54.81	17.67	229.45	88.93	469.68	104.78	1096.43	256.25	4470.26	7269.76
9	0.02	11.98	0.10	2.10	6.32	4.35	46.99	16.03	211.13	85.28	433.77	94.05	938.04	219.34	4220.41	7368.83
10	0.22	5.45	0.08	0.80	1.68	1.29	15.54	6.32	100.27	48.23	286.73	69.15	758.39	196.69	2501.71	6899.83
11	0.14	3.11	0.06	0.63	1.00	0.77	8.04	3.55	55.39	27.21	165.62	41.08	466.69	125.52	1437.58	7156.92
12	0.01	4.17	0.07	1.19	2.57	1.59	16.06	5.99	83.72	34.90	189.48	45.23	482.71	121.78	1793.78	7640.72
13	0.01	1.18	0.01	0.09	0.28	0.26	2.45	1.16	19.56	9.64	60.10	15.60	177.32	48.29	509.57	8881.46
14	0.01	6.31	0.04	0.62	1.80	1.52	17.37	7.50	114.80	53.52	311.15	75.01	809.82	210.59	2846.45	7077.95
15	0.08	5.79	0.10	1.19	2.50	1.70	18.10	6.92	104.07	46.59	270.36	65.35	707.60	184.51	2475.54	7189.75
16	0.24	13.23	0.43	6.15	10.68	6.73	60.57	19.70	247.30	92.32	451.59	99.44	977.32	222.84	4501.63	7242.39
17	0.22	4.97	0.08	0.66	1.70	1.11	13.87	5.67	89.09	42.95	249.02	60.78	661.35	169.64	2225.30	7125.61
18	0.15	15.58	0.15	2.01	3.66	2.50	26.36	9.28	123.71	49.22	248.82	54.94	547.75	127.47	2477.96	7676.02

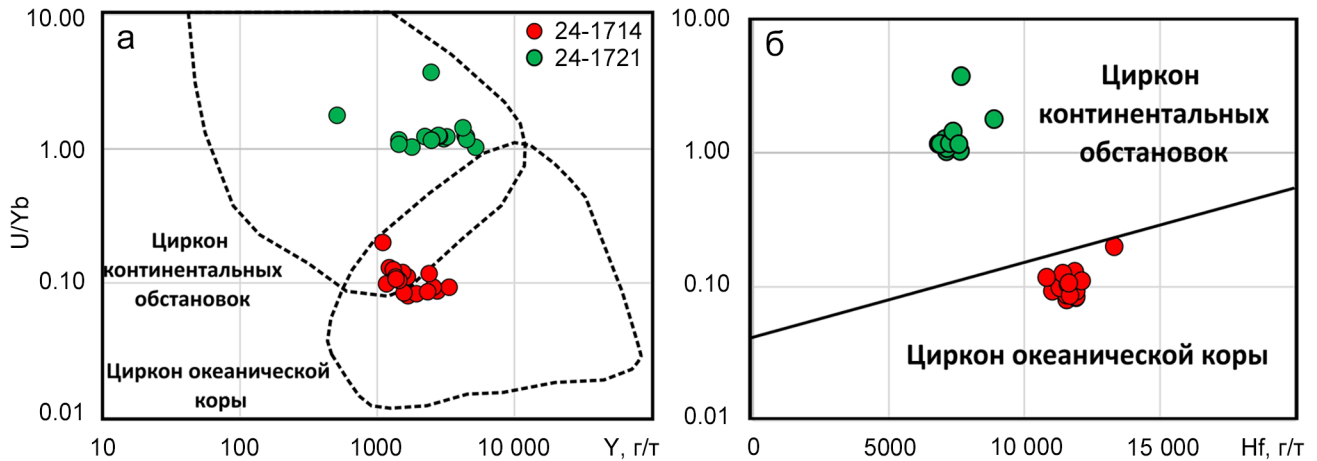


Рис. 8. Диаграммы отношений редких элементов в цирконе (Grimes et al., 2007).

а – U/Yb–Y, б – U/Yb–Hf.

Fig. 8. Rare earth element ratio diagrams for zircon (Grimes et al., 2007).

а – U/Yb–Y, б – U/Yb–Hf.

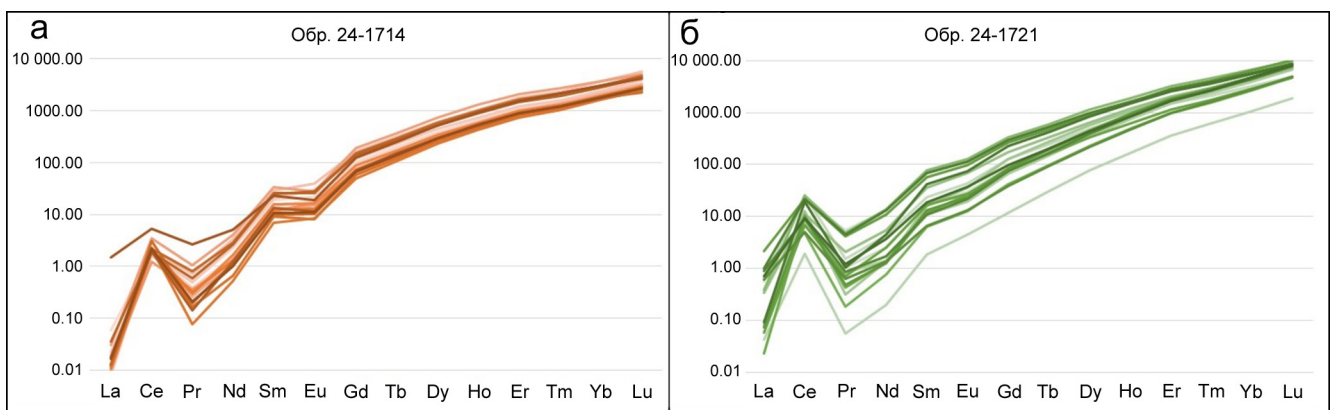


Рис. 9. Спектры распределения редкоземельных элементов в цирконах, нормированные по хондриту (Sun, McDonough, 1989).

а – обр. 24-1714, б – обр. 24-1721.

Fig. 9. Chondrite-normalized (Sun, McDonough, 1989) rare earth element distribution patterns in zircons.

а – sample 24-1714, б – sample 24-1721.

вого массива, расположенного в восточной части Горного Алтая, уран-свинцовым методом получено определение возраста 533 ± 14 млн лет (Зиндобрый и др., 2025). Также офиолиты АОЗ по возрасту близки офиолитовым комплексам северной Монголии (офиолитовый комплекс Улгий, 529 ± 2 млн лет, циркон из габбро (Zhu et al., 2024)). Широкое развитие раннекембрийских офиолитов в западной части АССО согласуется с тектоническими моделями, предполагающими заложение в раннем кембрии единой субдукционной зоны и соответствующей островодужной системе, включающей комплексы Салаирского кряжа, Горного Ал-

тая и северной Монголии (Şengör et al., 1993; Берзин и др., 1994; Буслов и др., 2000, 2013; Добрецов и др., 2005; Windley et al., 2007; Буслов, 2011, 2014). Полученные определения возраста заложения зоны субдукции на Салаире могут быть скоррелированы с событиями и в других частях ЦАСП. В частности, они совпадают со временем субдукционного метаморфизма сверхвысоких давлений в Кокчетавском метаморфическом поясе Казахстанского сектора ЦАСП (Добрецов и др., 2006; Stepanov et al., 2016). По-видимому, раннекембрийский возрастной рубеж соответствует времени важной тектонической перестройки в Палеоазиатском океане, связанной с

зложением внутриокеанических субдукционных зон и континентальной субдукцией. Полученные в последние годы данные о возрасте разобренных в современной структуре офиолитовых комплексов АССО и северо-западной части ЦАСП указывают на наличие двух важных эпох зарождения внутриокеанических субдукционных зон, имевших место ≈ 570 и ≈ 530 млн лет назад. Подобная синхронность свидетельствует в пользу предположения о том, что разобренные офиолитовые комплексы являются фрагментами единых палеосубдукционных зон.

ВЫВОДЫ

Надсубдукционные офиолиты Аламбайской офиолитовой зоны Салаира имеют раннекембрийский возраст 532 ± 4 млн лет. Время заложения зоны субдукции в данном секторе Палеоазиатского океана можно оценить приблизительно как 535–540 млн лет. Данный возраст может быть принят как нижняя граница времени формирования островодужных вулканических комплексов Салаирского кряжа.

Породные комплексы более древнего возраста в пределах Салаира могут представлять собой аккретированные к кембрийской островной дуге террейны, формировавшиеся в других частях Палеоазиатского океана, причем они должны располагаться юго-западнее АОЗ. Комплексы вулканической дуги, расположенные восточнее, должны иметь несколько более молодой возраст, что согласуется с имеющимися к настоящему времени данными.

Благодарности

Авторы благодарны д. г.-м. н. И.С. Новикову и к. г.-м. н. Н.С. Тычкову за помощь в организации полевых работ и к. т. н. Е.С. Жимулевой – за помощь в подготовке рукописи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабин Г.А., Гусев Н.И., Юрьев А.А., Уваров А.Н., Дубский В.С., Черных А.И., Щигрев А.Ф., Чусовитина Г.Д., Кораблева Т.В., Косякова Л.Н., Ляпунов И.А., Митрохин Д.В., Бычков А.И., Некипелый В.Л., Савина Ж.Н., Егоров А.С., Шор Г.М., Алексеенко В.Д., Булычев А.В., Радюкевич Н.М., Николаева Л.С., Богомолов В.П., Шипов Р.В., Сулова С.В., Сазонов В.А., Юрьева В.В., Хлебникова Т.В., Кондрашова А.К., Терета Н.Ф. (2007) Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (3-е поколение). Сер. Алтае-Саянская. Лист N-45 – Новокузнецк. Объясн. зап. СПб.: Картограф. фабрика ВСЕГЕИ, 665 с.
- Бабин Г.А., Юрьев А.А., Уваров А.Н., Бычков А.И., Дубский В.С., Щигрев А.Ф. (2005) Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (3-е поколение). Сер. Алтае-Саянская. Лист N-45 – Новокузнецк. СПб.: Картограф. фабрика ВСЕГЕИ.
- Берзин Н.А., Колман Р.Г., Добрецов Н.Л., Зоненшайн Л.П., Сяо Сючань, Чанг Э.З. (1994) Геодинамическая карта западной части Палеоазиатского океана. *Геология и геофизика*, **35**(7), 8-28.
- Буслов М.М. (2011) Тектоника и геодинамика Центрально-Азиатского складчатого пояса: роль позднепалеозойских крупноамплитудных сдвигов. *Геология и геофизика*, **52**(1), 66-90. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.01.006>
- Буслов М.М. (2014) Террейновая тектоника Центрально-Азиатского складчатого пояса. *Геодинамика и тектонофизика*, **5**(3), 641-665. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-3-0147>
- Буслов М.М., Ватанабе Т. (1996) Внутрисубдукционная коллизия и ее роль в эволюции аккреционного клина (на примере Курайской зоны Горного Алтая, Центральная Азия). *Геология и геофизика*, **37**(1), 82-93.
- Буслов М.М., Джен Х., Травин А.В., Отгонбаатар Д., Куликова А.В., Минг Ч., Глори С., Семаков Н.Н., Рубанова Е.С., Абилдаева М.А., Войтишек Е.А., Трофимова Д.А. (2013) Тектоника и геодинамика Горного Алтая и сопредельных структур Алтае-Саянской складчатой области. *Геология и геофизика*, **54**(12), 1600-1627. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.11.001>
- Буслов М.М., Фудживара И., Сафонова И.Ю., Окада Ш., Семаков Н.Н. (2000) Строение и эволюция зоны сочленения террейнов Рудного и Горного Алтая. *Геология и геофизика*, **41**(4), 383-398.
- Ветрова Н.И., Ветров Е.В., Летникова Е.Ф. (2022) Петрологическая модель формирования кислых вулканитов печеркинской свиты (северо-западная часть Салаирского кряжа). *Вестн. Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, **67**(4), 591-613. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.404>
- Добрецов Н.Л. (2003) Эволюция структур Урала, Казахстана, Тянь-Шаня и Алтае-Саянской области в Урало-Монгольском складчатом поясе (Палеоазиатский океан). *Геология и геофизика*, **44**(1-2), 5-27.
- Добрецов Н.Л., Буслов М.М., Жимулев Ф.И., Травин А.В., Заячковский А.А. (2006) Венд-раннеордовикская геодинамическая эволюция и модель эксгумации пород сверхвысоких и высоких давлений Кокчетавской субдукционно-коллизионной зоны (Северный Казахстан). *Геология и геофизика*, **47**(4), 428-445.
- Добрецов Н.Л., Буслов М.М., Сафонова И.Ю., Кох Д.А. (2004) Фрагменты океанических островов в структуре Курайского и Катунского аккреционных клиньев Горного Алтая. *Геология и геофизика*, **45**(12), 1381-1403.
- Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Буслов М.М., Котляров В.А. (2005) Магматизм и геодинамика Палеоазиатского океана на венд-кембрийском этапе его развития. *Геология и геофизика*, **46**(10), 962-967.
- Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Буслов М.М., Куренков С.А. (1992) Океанические и островодужные офиолиты Горного Алтая. *Геология и геофизика*, **33**(6), 3-14.
- Долгушин С.С., Жабин В.В., Лоскутов И.Ю., Садур О.Г. (2019) Перспективы создания базы хромового сырья Сибири. Новосибирск, СНИИГиМС, 238 с.
- Жимулев Ф.И., Котляров А.В., Фидлер М.А., Бехтерев Н.А. (2025) Состав, геологическое строение и модель формирования субдукционного меланжа Аламбайской меланжевой зоны Салаира (северо-за-

- пад Центрально-Азиатского Складчатого пояса). *Геология и геофизика*, **66**(10), 1231-1256. <https://doi.org/10.15372/GiG2025138>
- Жимулев Ф.И., Поспеева Е.В., Новиков И.С., Потапов В.В. (2021) Глубинное строение салаирского складчато-покровного сооружения (северо-запад Центрально-Азиатского складчатого пояса). *Геодинамика и тектонофизика*, **12**(1), 125-138. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-1-0517>
- Зиндобрый В.Д., Буслов М.М., Котляров А.В. (2025) Новые данные о возрасте и вещественном составе офиолитов Кабак-Тайгинского массива (Горный Алтай). *Геодинамика и тектонофизика*, **16**(2), 0814. <https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-2-0814>
- Зоненшайн Л.П. (1976) Реконструкция палеозойских океанов. *Дрейф континентов*. М.: Наука, 28-71.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. (1990) Тектоника литосферных плит территории СССР: в 2 т. М.: Недра. Т. 1. 328 с.
- Казанский А.Ю., Ступаков С.И., Симонов В.А., Метелкин Д.В. (2003) Геодинамика офиолитов Среднетерсинского массива (Кузнецкий Алатау) по палеомагнитным данным. *Геология и геофизика*, **44**(10), 1036-1044.
- Коновалова Н.А., Прусевич О.Г. (1977) Дунит-гарцбургитовые массивы Кузнецкого Алатау и Салаира (геологические особенности, условия формирования, хромитоносность). Новосибирск: Наука, Сиб. отд-е, 168 с.
- Котляров А.В., Жимулев Ф.И., Хуурак А.А., Фидлер М.А., Бехтерев Н.А. (2025) Палеоостроводужная природа гипербазитов Аламбайской офиолитовой зоны Салаира (северо-запад Центрально-Азиатского складчатого пояса) по данным изучения состава хромшпинелей. *Геосферн. исследования*, (3), 104-119. <https://doi.org/10.17223/25421379/36/6>
- Куренков С.А., Диденко А.Н., Симонов В.А. (2002) Геодинамика палеоспрединга. М.: ГЕОС, 294 с.
- Метелкин Д.В. (2012) Эволюция структур Центральной Азии и роль сдвиговой тектоники по палеомагнитным данным. Новосибирск: ИНГ СО РАН, 460 с.
- Пинус Г.В., Кузнецов В.А., Волохов И.М. (1958) Гипербазиты Алтае-Саянской складчатой области. М.: Госгеолтехиздат, 295 с.
- Плотников А.В., Ступаков С.И., Бабин Г.А., Владимиров А.Г., Симонов В.А. (2000) Возраст и геодинамическая природа офиолитов Кузнецкого Алатау. *Докл. РАН*, **372**(1), 80-85.
- Росляков Н.А., Щербаков Ю.Г., Алабин Л.В., Нестеренко Г.В., Калинин Ю.А., Рослякова Н.В., Васильева И.П., Неволько А.И., Осинцев С.Р. (2001) Минерагенная область сочленения Салаира и Кольвань-Томской складчатой зоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 243 с.
- Сафонова И.Ю., Симонов В.А., Буслов М.М., Ота Ц., Маруяма Ш. (2008) Неопротерозойские базальты Палеоазиатского океана из Курайского аккреционного клина (Горный Алтай): геохимия, петрогенезис, геодинамические обстановки формирования. *Геология и геофизика*, **49**(5), 335-356. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.12.002>
- Сенников Н.В., Лыкова Е.В., Обут О.Т., Токарев В.Н., Тимохин А.В., Щербаненко Т.А., Закирьянов И.Г. (2025) Биостратиграфия и проявления вулканизма в ордовике Салаира. *Геология и геофизика*, **66**(3), 277-302. <https://doi.org/10.15372/GiG2024164>
- Симонов В.А. (1993) Петрогенезис офиолитов: термобарогеохимические исследования. Новосибирск, 247 с. (*Тр. ОИГГуМ*).
- Симонов В.А., Добрецов Н.Л., Буслов М.М. (1994) Бонинитовые серии в структурах Палеоазиатского океана. *Геология и геофизика*, **35**(7-8), 182-199.
- Симонов В.А., Котляров А.В., Куликова А.В. (2024) Условия формирования палеоокеанических комплексов Алтае-Саянской складчатой области. Новосибирск: Сиб. отд-е РАН, 309 с. <https://doi.org/10.53954/9785605099505>
- Симонов В.А., Куликова А.В., Котляров А.В., Колотилина Т.Б. (2021) Палеогеодинамика магматических и метаморфических процессов формирования ультрамафитов Чаган-Узунского массива (офиолиты Горного Алтая). *Геодинамика и тектонофизика*, **12**(4), 826-850. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-4-0557>
- Симонов В.А., Сафонова И.Ю., Ковязин С.В. (2010) Петрогенезис островодужных комплексов Чарской зоны, Восточный Казахстан. *Петрология*, **18**(1), 59-72. <https://doi.org/10.1134/S0869591110010045>
- Симонов В.А., Ступаков С.И., Лоскутов И.Ю., Ковязин С.В. (1999) Палеогеодинамические условия формирования офиолитов Кузнецкого Алатау. *Геология и геофизика*, **40**(12), 1759-1771.
- Симонов В.А., Чернышов А.И., Котляров А.В. (2022) Минералогия и генезис ультрабазитов Куртушибинского офиолитового пояса (Западный Саян). *Минералогия*, **8**(2), 49-62.
- Симонов В.А., Чернышов А.И., Котляров А.В. (2020) Физико-химические параметры формирования ультрамафитов из офиолитов Кузнецкого Алатау. *Геосферн. исследования*, (1), 34-49.
- Склярков Е.В., Ковач В.П., Котов А.Б., Кузьмичев А.Б., Лавренчук А.В., Переляев В.И., Щипанский А.А. (2016) Бониниты и офиолиты: проблемы их соотношения и петрогенезиса бонинитов. *Геология и геофизика*, **57**(2), 163-180. <https://doi.org/10.15372/GiG20160109>
- Терехов Е.Н. (2004) К проблеме происхождения кислых пород с положительной Eu-аномалией – индикаторов процессов растяжения (восточная часть Балтийского щита). *Докл. РАН*, **397**(5), 675-679.
- Токарев В.Н., Куртигешев В.С., Ефремова Н.М. (2019) Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-6 1:200 000 (изд-е 2-е). Сер. Кузбасская. Лист N-45-XXVI (Целинное): Объясн. зап. М.: Моск. фил. ФГБУ “ВСЕГЕИ”.
- Токарев В.Н., Шатилова Г.А., Котик О.П. (2002) Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Изд-е 2-е. Сер. Кузбасская. Лист N-45-XIV (Гурьевск). Объясн. зап. СПб.: Картограф. фабрика ВСЕГЕИ.
- Токарев В.Н., Юрьев А.А., Косякова Л.Н., Глаас Г.А. (2019) Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-6 1:200 000. Изд-е 2-е. Сер. Кузбасская. Лист N-45-XXI (Прокопьевск). Объясн. зап. СПб.: Картограф. фабрика ВСЕГЕИ.
- Фомичев В.Д., Алексеева Л.Э. (1961) Геологический очерк Салаира. М.: Госгеолтехиздат, 218 с. (*Тр. ВСЕГЕИ, нов. сер.*).
- Шокальский С.П., Бабин Г.А., Владимиров А.Г., Бори-

- сов С.М., Гусев Н.И., Токарев В.Н., Зыбин В.А., Дубский В.С., Мурзин О.В., Кривчиков В.А., Крук Н.Н., Руднев С.Н., Федосеев Г.С., Титов А.В., Сергеев В.П., Лихачев Н.Н., Мамлин А.Н., Котельников Е.И., Кузнецов С.А., Зейферт Л.Л., Яшин В.Д., Носков Ю.С., Уваров А.Н., Федак С.И., Гусев А.И., Выставной С.А. (2000) Корреляция магматических и метаморфических комплексов западной части Алтае-Саянской складчатой области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, фил. "Гео", 118 с.
- Baker J., Peate D., Waight T., Meyzen C. (2004) Pb isotopic analysis of standards and samples using a ^{207}Pb - ^{204}Pb double spike and thallium to correct for mass bias with a double-focusing MC-ICP-MS. *Chem. Geol.*, **211**(3-4), 275-303. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.030>
- Ballard J.R., Palin M.J., Campbell I.H. (2002) Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: application to porphyry copper deposits of northern Chile. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **144**(3), 347-364. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0402-5>
- Belyaev V.A., Wang K.-L., Gornova M.A., Dril' S.I., Karimov A.A., Medvedev A.Ya., Noskova Yu.V. (2017) Geochemistry and origin of the Eastern Sayan ophiolites, Tuva-Mongolian microcontinent (Southern Siberia). *Geodyn. Tectonophys.*, **8**(3), 411-415. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-3-0250>
- Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., Aleinikoff J.N., Davis D.W., Korsch R.J., Foudoulis C. (2003) TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chem. Geol.*, **200**(1-2), 155-170. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(03\)00165-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(03)00165-7)
- Buslov M.M. (2014) Terrain tectonics of the Central Asian folded belt. *Geodyn. Tectonophys.*, **5**(3), 641-665. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-3-0147>
- Buslov M.M., Fujiwara Y., Iwata K., Semakov N.N. (2004) Late Paleozoic-Early Mesozoic Geodynamics of Central Asia. *Gondv. Res.*, **7**(3), 791-808. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)71064-9](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)71064-9)
- Buslov M.M., Saphonova I.Yu., Watanabe T., Obut O.T., Fujiwara Y., Iwata K., Semakov N.N., Sugai Y., Smirnova L.V., Kazansky A.Yu. (2001) Evolution of the Paleo-Asian Ocean (Altai-Sayan Region, Central Asia) and collision of possible Gondwana-derived terranes with the southern marginal part of the Siberian continent. *Geosci. J.*, **5**(3), 203-224. <https://doi.org/10.1007/BF02910304>
- Coleman R.G., Peterman Z.E. (1975) Oceanic Plagiogranite. *J. Geophys. Res.*, **80**(8), 1099-1108.
- Condie K.C., Stern R.J. (2023) Ophiolites: Identification and tectonic significance in space and time. *Geosci. Front.*, **14**(1), 101680.
- Dobretsov N.L., Buslov M.M., Yu U. (2004) Fragments of oceanic islands in accretion-collision areas of Gorny Altai and Salair, southern Siberia, Russia: early stages of continental crustal growth of the Siberian continent in Vendian-Early Cambrian time. *J. Asian Earth Sci.*, **23**(5), 673-690. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(03\)00132-9](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(03)00132-9)
- Ferry J.M., Watson E.B. (2007) New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **154**(4), 429-437. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0201-0>
- Flower M.F.J. (2003) Ophiolites, historical contingency, and the Wilson cycle. *Ophiolite Concept and the Evolution of Geological Thought*. Geological Society of America, Boulder, Colorado, 111-135. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2373-6.111>
- Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D. (2001) A geochemical classification for granitic rocks. *J. Petrol.*, **42**(11), 2033-2048. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.11.2033>
- Furnes H., Safonova I. (2019) Ophiolites of the Central Asian Orogenic Belt: Geochemical and petrological characterization and tectonic settings. *Geosci. Front.*, **10**(4), 1255-1284. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.007>
- Grimes C.B., John B.E., Kelemen P.B., Mazdab F.K., Wooden J.L., Cheadle M.J., Hanghøj K., Schwartz J.J. (2007) Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: A method for distinguishing detrital zircon provenance. *Geol.*, **35**(7), 643-646. <https://doi.org/10.1130/G23603A.1>
- Horstwood M.S.A., Košler J., Gehrels G., Jackson S.E., McLean N.M., Paton C., Pearson N.J., Sircombe K., Sylvester P., Vermeesch P., Bowring J.F., Condon D.J., Schoene B. (2016) Community-Derived Standards for LA-ICP-MS U-(Th)-Pb Geochronology – Uncertainty Propagation, Age Interpretation and Data Reporting. *Geostand. Geoanal. Res.*, **40**(3), 311-332. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2016.00379.x>
- Khain E.V., Bibikova E.V., Kröner A., Zhuravlev D.Z., Sklyarov E.V., Fedotova A.A., Kravchenko-Berezhnoy I.R. (2002) The most ancient ophiolite of the Central Asian fold belt: U-Pb and Pb-Pb zircon ages for the Duzhugur Complex, Eastern Sayan, Siberia, and geodynamic implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **199**(3-4), 311-325. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00587-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00587-3)
- Kotlyarov A.V., Simonov V.A., Safonova I.Yu. (2018) Boninites as a criterion for the geodynamic development of magmatic systems in paleosubduction zones in Gorny Altai. *Geodyn. Tectonophys.*, **9**(1), 39-58. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0336>
- Ludwig K.R. (2012) Isoplot/Ex ver. 3.71: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronol. Center Spec. Publ.*, No. 4.
- Maniar P.D., Piccoli P.M. (1989) Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **101**(5), 635-643.
- Milson J. (2003) Forearc ophiolites: A view from the western Pacific. *Ophiolites in Earth History*, 507-515. (*Geol. Soc., Lond., Spec. Publ.*, **218**).
- Miyashiro A. (1973) The Troodos ophiolitic complex was probably formed in an island arc. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **19**(2), 218-224. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(73\)90118-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(73)90118-0)
- Mongush A.A., Gusev N.I., Oydup Ch.K., Kadyr-ool Ch.O., Hertek Ch.M., Lesnov F.P., Druzhkova E.K. (2025) Age and Geodynamic Position of Ophiolites of Kurtushiba Ridge of Western Sayan. *Dokl. Earth Sci.*, **520**(1), 1-10. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24604620>
- Mongush A.A., Lebedev V.I., Travin A.V., Yarmolyuk V.V. (2011) Ophiolites of Western Tyva as fragments of a late Vendian Island arc of the Paleasian ocean. *Dokl. Earth Sci.*, **441**(2), 866-871.
- Norris A., Danyushevsky L. (2021) LADR (Software manual). University of Tasmania.
- Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. (1984a) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, **25**(4), 956-983.

- Pearce J.A., Lippard S.J., Roberts S. (1984b) Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites. *Geol. Soc., Lond., Spec. Publ.*, **16**(1), 77-94. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1984.016.01.06>
- Pedersen R. B., Malpas J. (1984) The origin of oceanic plagiogranites from the Karmøy ophiolite, Western Norway. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **88**, 36-52.
- Pfänder J.A., Jochum K.P., Galer S.J., Hellebrand E.W., Jung S., Kröner A. (2021) Geochemistry of ultramafic and mafic rocks from the northern Central Asian Orogenic Belt (Tuva, Central Asia)-constraints on lower and middle arc crust formation linked to late Proterozoic intra-oceanic subduction. *Precamb. Res.*, **356**, 106061.
- Pfänder J., Jochum K., Kozakov I., Kröner A., Todt W. (2002) Coupled evolution of back-arc and island arc-like mafic crust in the late-Neoproterozoic Agardagh Tschermak ophiolite, Central Asia: evidence from trace element and Sr-Nd-Pb isotope data. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **143**(2), 154-174. <https://doi.org/10.1007/s00410-001-0340-7>
- Reagan M., Heaton D., Schmitz M., Pearce J., Shervais J., Koppers A. (2019) Forearc ages reveal extensive short-lived and rapid seafloor spreading following subduction initiation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **506**, 520-529. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.11.020>
- Reagan M.K., Ishizuka O., Stern R.J., Kelley K.A., Ohara Y., Blichert-Toft J., Bloomer S.H., Cash J., Fryer P., Hanan B.B., Hickey-Vargas R., Ishii T., Kimura J.-I., Peate D.W., Rowe M.C., Woods M. (2010) Fore-arc basalts and subduction initiation in the Izu-Bonin-Mariana system. *Geochem., Geophys., Geosyst.*, **11**(3), Q03X12. <https://doi.org/10.1029/2009GC002871>
- Rudnev S.N., Borisov S.M., Babin G.A., Levchenkov O.A., Makeev A.F., Serov P.A., Matukov D.I., Plotkina Yu.V. (2008) Early Paleozoic batholiths in the northern part of the Kuznetsk Alatau: Composition, age, and sources. *Petrology*, **16**(4), 395-419. <https://doi.org/10.1134/S086959110804005X>
- Safonova I., Kotlyarov A., Krivonogov S., Xiao W. (2017) Intra-oceanic arcs of the Paleo-Asian Ocean. *Gondw. Res.*, **50**, 167-194. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.04.005>
- Şengör A.M.C., Natal'in B.A., Burtman V.S. (1993) Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, **364**(6435), 299-307.
- Sláma J., Košler J., Condon D.J., Crowley J.L., Gerdes A., Hanchar J.M., Horstwood M.S.A., Morris G.A., Nasdala L., Norberg N., Schaltegger U., Schoene B., Tubrett M.N., Whitehouse M.J. (2008) Plešovice zircon – A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chem. Geol.*, **249**(1-2), 1-35. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>
- Stepanov A.S., Rubatto D., Hermann J., Korsakov A.V. (2016) Contrasting PT paths within the Barchi-Kol UHP terrain (Kokchetav Complex): Implications for subduction and exhumation of continental crust. *Amer. Miner.*, **101**(4), 788-807. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5454>
- Stern R.J., Reagan M., Ishizuka O., Ohara Y., Whattam S. (2012) To understand subduction initiation, study forearc crust: To understand forearc crust, study ophiolites. *Lithosphere*, **4**(5), 469-483.
- Sun S.-S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geol. Soc., Lond., Spec. Publ.*, **42**(1), 313-345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Szymanowski D., Fehr M.A., Guillong M., Coble M.A., Wotzlaw J.-F., Nasdala L., Ellis B.S., Bachmann O., Schönbächler M. (2018) Isotope-dilution anchoring of zircon reference materials for accurate Ti-in-zircon thermometry. *Chem. Geol.*, **481**, 146-154. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.02.001>
- Torabi G., Morishita T., Arai S. (2019) Two Types of Plagiogranite from Mesozoic Ashin Ophiolite (Central Iran): a mark of tectonic setting change from Jurassic to Cretaceous. *Geotectonics*, **53**(1), 110-124.
- Vetrova N.I., Vetrov E.V. (2024) Synchronous felsic volcanism and carbonate sedimentation as a setting for VMS deposits localization at the Salair terrane, NE Central Asian Orogenic Belt. *Gondw. Res.*, **136**, 53-72. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2024.08.014>
- Vetrova N.I., Vetrov E.V., Letnikova E.F., Soloshenko N.G. (2022) Age of the Kinterep formation of the Northwestern Salair: chemostratigraphy and U-Pb zircon dating. *Geodyn. Tectonophys.*, **13**(2s). <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0597>
- Wakita K. (2015) OPS mélange: a new term for mélanges of convergent margins of the world. *Int. Geol. Rev.*, **57**(5-8), 529-539. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.949312>
- Windley B.F., Alexeiev D., Xiao W., Kröner A., Badarch G. (2007) Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *J. Geol. Soc.*, **164**(1), 31-47. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-022>
- Zhimulev F.I., Gillespie J., Glorie S., Jepson G., Vetrov E.V., De Grave J. (2020) Tectonic history of the Kolyvan-Tomsk folded zone (KTFZ), Russia: Insight from zircon U/Pb geochronology and Nd isotopes. *Geol. J.*, **55**(3), 1913-1930. <https://doi.org/10.1002/gj.3679>
- Zhimulev F.I., Kotlyarov A.V., Travin A.V., Fidler M.A., Khurak A.A. (2024) The Shalap mélange of the Alambay Salair ophiolite zone (north-west of the Central Asian orogenic belt), geological structure and features of the amphibolites and greenstone basalt composition. *Geodyn. Tectonophys.*, **15**(3), 0757. <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-3-0757>
- Zhimulev F.I., Pospeeva E.V., Novikov I.S., Potapov V.V. (2021) Deep structure of the Salair fold-nappe terrane (NW CAO) according to magnetotelluric sounding. *Geodyn. Tectonophys.*, **12**(1), 125-138. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-1-0517>
- Zhimulev F.I., Pospeeva E.V., Potapov V.V., Novikov I.S., Kotlyarov A.V. (2023) Salair-Gornaya Shoria Junction (Northwestern Central Asian Orogenic Belt): Deep Structure and Tectonics from Magnetotelluric Data. *Russ. Geol. Geophys.*, **64**(6), 558-570 (translated from *Geol. Geofiz.*, **64**, 674-690). <https://doi.org/10.2113/RGG20224479>
- Zhu M., Pastor-Galán D., Smit M.A., Miao L., Dong M., Zhang F., Sanchir D., Ganbat A., Liu C., Luo Y., Li S. (2024) Ophiolites in the Central Asian Orogenic Belt record Cambrian subduction initiation processes. *Commun. Earth Environ.*, **5**(1), 753. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01905-7>

REFERENCES

Babin G.A., Gusev N.I., Yur'ev A.A., Uvarov A.N., Dubskii V.S., Chernykh A.I., Shchigrev A.F., Chusoviti-

- na G.D., Korableva T.V., Kosyakova L.N., Lyapunov I.A., Mitrokhin D.V., Bychkov A.I., Nekipelyi V.L., Savina Zh.N., Egorov A.S., Shor G.M., Alekseenko V.D., Bulychev A.V., Radyukevich N.M., Nikolayeva L.S., Bogomolov V.P., Shipov R.V., Suslova S.V., Sazonov V.A., Yur'eva V.V., Khlebnikova T.V., Kondrashova A.K., Tereda N.F. (2007) State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (3rd ed.). Ser. Altai-Sayan. Sheet N-45 – Novokuznetsk. Explanatory notes. St.Petersburg, Cartographic Factory of VSEGEI, 665 p. (In Russ.)
- Babin G.A., Yuriev A.A., Uvarov A.N., Bychkov A.I., Dubskii V.S., Shchigrev A.F. (2005) State Geological Map of the Russian Federation. M-b 1:1,000,000 (3rd ed.). Ser. Altai-Sayan. Sheet N-45 – Novokuznetsk. St.Petersburg, Cartographic Factory of VSEGEI. (In Russ.)
- Baker J., Peate D., Waight T., Meyzen C. (2004) Pb isotopic analysis of standards and samples using a ^{207}Pb – ^{204}Pb double spike and thallium to correct for mass bias with a double-focusing MC-ICP-MS. *Chem. Geol.*, **211**(3-4), 275-303. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.030>
- Ballard J.R., Palin M.J., Campbell I.H. (2002) Relative oxidation states of magmas inferred from Ce(IV)/Ce(III) in zircon: application to porphyry copper deposits of northern Chile. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **144**, 347-364. <https://doi.org/10.1007/s00410-002-0402-5>
- Belyaev V.A., Wang K.-L., Gornova M.A., Dril' S.I., Karimov A.A., Medvedev A.Ya., Noskova Yu.V. (2017) Geochemistry and origin of the Eastern Sayan ophiolites, Tuva-Mongolian microcontinent (Southern Siberia). *Geodyn. Tectonophysics.*, **8**, 411-415. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-3-0250>
- Berzin N.A., Coleman R.G., Dobretsov N.L., Zonenshain L.P., Xiao Xuchang, Chang E.Z. (1995) Geodynamic map of the western Paleo-Asian Ocean. *Russ. Geol. Geophys.*, **36**(7), 3-21 (translated from *Geol. Geofiz.*, (1994), **35**, 8-28).
- Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., Aleinikoff J.N., Davis D.W., Korsch R.J., Foudoulis C. (2003) TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U–Pb geochronology. *Chem. Geol.*, **200**, 155-170. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(03\)00165-7](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(03)00165-7)
- Buslov M.M. (2011) Tectonics and geodynamics of the Central Asian Fold Belt: The role of Late Paleozoic large-amplitude strike-slip faults. *Russ. Geol. Geophys.*, **52**(1), 52-71 (translated from *Geol. Geofiz.*, **52**, 66-90). <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.01.006>
- Buslov M.M. (2014) Terrane tectonics of the Central Asian folded belt. *Geodyn. Tectonophysics.*, **5**(3), 641-665. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT2014530147>.
- Buslov M.M., De Grave J., Travin A.V., Otgonbaatar D., Kulikova A.V., Ming C., Gloria S., Semakov N.N., Rubanova E.S., Abildaeva M.A., Voytishchek E.A., Trofimova D.A. (2013) Tectonics and geodynamics of the Gorny Altai and adjacent structures of the Altai-Sayan Fold Area. *Russ. Geol. Geophys.*, **54**(10), 1250-1271 (translated from *Geol. Geofiz.*, **54**, 1600-1627). <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.11.001>
- Buslov M.M., Fujiwara Y., Iwata K., Semakov N.N. (2004) Late Paleozoic-Early Mesozoic Geodynamics of Central Asia. *Gondw. Res.*, **7**, 791-808. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)71064-9](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)71064-9)
- Buslov M.M., Fujiwara I., Safonova I.Yu., Okada Sh., Semakov N.N. (2000) The junction zone of the Gorny Altai and Rudny Altai terranes: structure and evolution. *Geol. Geophys.*, **41**(3), 377-390 (translated from *Geol. Geofiz.*, **41**(3), 383-398).
- Buslov M.M., Saphonova I.Yu., Watanabe T., Obut O.T., Fujiwara Y., Iwata K., Semakov N.N., Sugai Y., Smirnova L.V., Kazansky A.Yu. (2001) Evolution of the Paleo-Asian Ocean (Altai-Sayan Region, Central Asia) and collision of possible Gondwana-derived terranes with the southern marginal part of the Siberian continent. *Geosci. J.*, **5**, 203-224. <https://doi.org/10.1007/BF02910304>
- Buslov M.M., Watanabe T. (1997) Intra-subduction collision and its role in the evolution of an accretionary wedge: An example from the Kurai zone of Gorny Altai, Central Asia. *Russ. Geol. Geophys.*, **38**(1), 71-82 (translated from *Geol. Geofiz.*, 1996, **37**, 82-93).
- Coleman R.G., Peterman Z.E. (1975) Oceanic Plagiogranite. *J. Geophys. Res.*, **80**, 1099-1108.
- Condie K.C., Stern R.J. (2023) Ophiolites: Identification and tectonic significance in space and time. *Geosci. Front.*, **14**, 101680.
- Dobretsov N.L. (2003) Evolution of structures of the Urals, Kazakhstan, Tien Shan, and Altai-Sayan Region within the Ural-Mongolian Foldbelt (Paleoasian Ocean). *Russ. Geol. Geophys.*, **44**(1-2), 3-24 (translated from *Geol. Geofiz.*, **44**, 5-27).
- Dobretsov N.L., Buslov M.M., Safonova I.Yu., Kokh D.A. (2004) Fragments of oceanic islands in the structure of the Kurai and Katun accretionary wedges of Gorny Altai. *Russ. Geol. Geophys.*, **45**(12), 1219-1238 (translated from *Geol. Geofiz.*, **45**, 1381-1403).
- Dobretsov N.L., Buslov M.M., Yu U. (2004) Fragments of oceanic islands in accretion–collision areas of Gorny Altai and Salair, southern Siberia, Russia: early stages of continental crustal growth of the Siberian continent in Vendian–Early Cambrian time. *J. Asian Earth Sci.*, **23**(5), 673-690. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(03\)00132-9](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(03)00132-9)
- Dobretsov N.L., Buslov M.M., Zhimulev F.I., Travin A.V., Zayachkovskiy A.A. (2006) Vendian-Early Ordovician geodynamic evolution and exhumation model for ultra-high- and high-pressure rocks of the Kokchetav subduction-collision zone (Northern Kazakhstan). *Russ. Geol. Geophys.*, **47**(4), 388-406 (translated from *Geol. Geofiz.*, **47**, 428-445).
- Dobretsov N.L., Simonov V.A., Buslov M.M., Kotlyarov V.A. (2005) Magmatism and geodynamics of the Paleo-Asian Ocean in the Vendian-Cambrian stage of its evolution. *Russ. Geol. Geophys.*, **46**(10), 870-875 (translated from *Geol. Geofiz.*, **46**, 962-967).
- Dobretsov N.L., Simonov V.A., Buslov M.M., Kurenkov S.A. (1993) Oceanic and island-arc ophiolites of Gorny Altai. *Russ. Geol. Geophys.*, **34**(6), 3-14 (translated from *Geol. Geofiz.*, (1992), **33**, 3-14).
- Dolgushin S.S., Zhabin V.V., Loskutov I.Yu., Sadur O.G. (2019) Prospects for creating a chromium raw material base in Siberia. Novosibirsk, SNIIGiMS Publ., 238 p. (In Russ.)
- Ferry J.M., Watson E.B. (2007) New thermodynamic models and revised calibrations for the Ti-in-zircon and Zr-in-rutile thermometers. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **154**, 429-437. <https://doi.org/10.1007/s00410-007-0201-0>
- Flower M.F.J. (2003) Ophiolites, historical contingency, and the Wilson cycle, in: Ophiolite Concept and the Evolution of Geological Thought. The Geological Society

- of America, Boulder, Colorado, 111-135. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2373-6.111>
- Fomichev V.D., Alekseeva L.E. (1961) Geological Outline of Salair. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 218 p. (*Tr. VSEGEI, nov. ser.*) (In Russ.)
- Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D. (2001) A geochemical classification for granitic rocks. *J. Petrol.*, **42**, 2033-2048. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.11.2033>
- Furnes H., Safonova I. (2019) Ophiolites of the Central Asian Orogenic Belt: Geochemical and petrological characterization and tectonic settings. *Geosci. Front.*, **10**, 1255-1284. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.007>
- Grimes C.B., John B.E., Kelemen P.B., Mazdab F.K., Wooden J.L., Cheadle M.J., Hanghøj K., Schwartz J.J. (2007) Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: A method for distinguishing detrital zircon provenance. *Geol.*, **35**, 643-646. <https://doi.org/10.1130/G23603A.1>
- Horstwood M.S.A., Košler J., Gehrels G., Jackson S.E., McLean N.M., Paton C., Pearson N.J., Sircombe K., Sylvester P., Vermeesch P., Bowring J.F., Condon D.J., Schoene B. (2016) Community-Derived Standards for LA-ICP-MS U-(Th)-Pb Geochronology – Uncertainty Propagation, Age Interpretation and Data Reporting. *Geostand. Geoanalyt. Res.*, **40**, 311-332. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2016.00379.x>
- Kazansky A.Yu., Stupakov S.I., Simonov V.A., Metelkin D.V. (2003) Geodynamics of the ophiolites of the Srednetersin Massif (Kuznetsk Alatau) from paleomagnetic data. *Russ. Geol. Geophys.*, **44**(10), 915-922 (translated from *Geol. Geofiz.*, **44**, 1036-1044).
- Khain E.V., Bibikova E.V., Kröner A., Zhuravlev D.Z., Sklyarov E.V., Fedotova A.A., Kravchenko-Berezhnoy I.R. (2002) The most ancient ophiolite of the Central Asian fold belt: U–Pb and Pb–Pb zircon ages for the Dunzhugur Complex, Eastern Sayan, Siberia, and geodynamic implications. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **199**, 311-325. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00587-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00587-3)
- Kononova N.A., Prusevich O.G. (1977) Dunitite-Harzburgite Massifs of the Kuznetsk Alatau and Salair (Geological Features, Formation Conditions, and Chromite Potential). Novosibirsk, Nauka Publ., Sib. Otd-e, 168 p. (In Russ.)
- Kotlyarov A.V., Simonov V.A., Safonova I.Yu. (2018) Boninites as a criterion for the geodynamic development of magmatic systems in paleosubduction zones in Gorny Altai. *Geodyn. Tectonophys.*, **9**, 39-58. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0336>
- Kotlyarov A.V., Zhimulev F.I., Khuurak A.A., Fidler M.A., Bekhterev N.A. (2025) Chromian Spinel Evidence for the Paleo-Island Arc Affinity of Hyperbasites from the Alambay Ophiolite Zone (Salair, NW Central Asian Orogenic Belt). *Geosfernye Issledovaniya*, (3), 104-119. (In Russ.)
- Kurenkov S.A., Didenko A.N., Simonov V.A. (2002) Geodynamics of Paleo-Spreading. Moscow, GEOS Publ., 294 p. (In Russ.)
- Ludwig K.R. (2012) Isoplot/Ex ver. 3.71: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. *Berkeley Geochronol. Center Spec. Publ.*, No. 4.
- Maniar P.D., Piccoli P.M. (1989) Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 635-643. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101<0635](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635)
- Metelkin D.V. (2012) Evolution of Central Asian Structures and the Role of Strike-Slip Tectonics from Paleomagnetic Data. Novosibirsk, INGG SO RAN Publ., 460 p. (In Russ.)
- Milson J. (2003) Forearc ophiolites: A view from the western Pacific. *Ophiolites in Earth History*, 507-515. (*Geol. Soc., Lond., Spec. Publ.*, **218**).
- Miyashiro A. (1973) The Troodos ophiolitic complex was probably formed in an island arc. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **19**(2), 218-224. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(73\)90118-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(73)90118-0)
- Mongush A.A., Gusev N.I., Oydup Ch.K., Kadyr-ool Ch.O., Hertek Ch.M., Lesnov F.P., Druzhkova E.K. (2025) Age and Geodynamic Position of Ophiolites of Kurtushiba Ridge of Western Sayan. *Dokl. Earth Sci.*, **520**(1), 1-10. <https://doi.org/10.1134/S1028334X24604620>
- Mongush A.A., Lebedev V.I., Travin A.V., Yarmolyuk V.V. (2011) Ophiolites of Western Tyva as fragments of a late Vendian Island arc of the Paleoasian ocean. *Dokl. Earth Sci.*, **441**(2), 866-871.
- Norris A., Danyushevsky L. (2021) LADR (Software manual). University of Tasmania.
- Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. (1984a) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.*, **25**(4), 956-983.
- Pearce J.A., Lippard S.J., Roberts S. (1984b) Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites. *Geol. Soc., Lond., Spec. Publ.*, **16**(1), 77-94. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1984.016.01.06>
- Pedersen R. B., Malpas J. (1984) The origin of oceanic plagiogranites from the Karmoy ophiolite, Western Norway. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **88**, 36-52.
- Pfänder J.A., Jochum K.P., Galer S.J., Hellebrand E.W., Jung S., Kröner A. (2021) Geochemistry of ultramafic and mafic rocks from the northern Central Asian Orogenic Belt (Tuva, Central Asia)-constraints on lower and middle arc crust formation linked to late Proterozoic intra-oceanic subduction. *Precamb. Res.*, **356**, 106061.
- Pfänder J., Jochum K., Kozakov I., Kröner A., Todt W. (2002) Coupled evolution of back-arc and island arc-like mafic crust in the late-Neoproterozoic Agardagh Tschermak ophiolite, Central Asia: evidence from trace element and Sr-Nd-Pb isotope data. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **143**(2), 154-174. <https://doi.org/10.1007/s00410-001-0340-7>
- Pinus G.V., Kuznetsov V.A., Volokhov I.M. (1958) Ultramafic Rocks of the Altai-Sayan Fold Area. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 295 p. (In Russ.)
- Plotnikov A.V., Stupakov S.I., Babin G.A., Vladimirov A.G., Simonov V.A. (2000) Age and geodynamic nature of the Kuznetsk Alatau ophiolites. *Dokl. RAN*, **372**(1), 80-85. (In Russ.)
- Reagan M., Heaton D., Schmitz M., Pearce J., Shervais J., Koppers A. (2019) Forearc ages reveal extensive short-lived and rapid seafloor spreading following subduction initiation. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **506**, 520-529. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.11.020>
- Reagan M.K., Ishizuka O., Stern R.J., Kelley K.A., Ohara Y., Blichert-Toft J., Bloomer S.H., Cash J., Fryer P., Hanan B.B., Hickey-Vargas R., Ishii T., Kimura J.-I., Peate D.W., Rowe M.C., Woods M. (2010) Fore-arc basalts and subduction initiation in the Izu-Bonin-Mariana system. *Geochem., Geophys., Geosyst.*, **11**(3), Q03X12. <https://doi.org/10.1029/2009GC002871>
- Roslyakov N.A., Shcherbakov Yu.G., Alabin L.V., Nesterov

- renko G.V., Kalinin Yu.A., Roslyakova N.V., Vasil'eva I.P., Nevol'ko A.I., Osintsev S.R. (2001) Metallogeny of the Junction Zone Between Salair and the Kolyvan-Tom Fold Zone. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN Publ., 243 p. (In Russ.)
- Rudnev S.N., Borisov S.M., Babin G.A., Levchenkov O.A., Makeev A.F., Serov P.A., Matukov D.I., Plotkina Yu.V. (2008) Early Paleozoic batholiths in the northern part of the Kuznetsk Alatau: Composition, age, and sources. *Petrology*, **16**(4), 395-419. <https://doi.org/10.1134/S086959110804005X>
- Safonova I., Kotlyarov A., Krivonogov S., Xiao W. (2017) Intra-oceanic arcs of the Paleo-Asian Ocean. *Gondwana Res.*, **50**, 167-194. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.04.005>
- Safonova I.Yu., Simonov V.A., Buslov M.M., Ota T., Maruyama Sh. (2008) Neoproterozoic basalts of the Paleo-Asian Ocean from the Kurai accretionary wedge (Gorny Altai): Geochemistry, petrogenesis, and geodynamic settings of formation. *Russ. Geol. Geophys.*, **49**(4), 254-271 (translated from *Geol. Geofiz.*, **49**, 335-356). <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.12.002>
- Şengör A.M.C., Natal'in B.A., Burtman V.S. (1993) Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia. *Nature*, **364**(6435), 299-307.
- Sennikov N.V., Lykova E.V., Obut O.T., Tokarev V.N., Timokhin A.V., Shcherbanenko T.A., Zakir'yanov I.G. (2025) Ordovician biostratigraphy and volcanism of Salair. *Russ. Geol. Geophys.*, **66**(3), 253-276 (translated from *Geol. Geofiz.*, **66**(3), 277-302). <https://doi.org/10.15372/RGG2024164>
- Shokal'skii S.P., Babin G.A., Vladimirov A.G., Borisov S.M., Gusev N.I., Tokarev V.N., Zybin V.A., Dubskii V.S., Murzin O.V., Krivchikov V.A., Kruk N.N., Rudnev S.N., Fedoseev G.S., Titov A.V., Sergeev V.P., Likhachev N.N., Mamlin A.N., Kotel'nikov E.I., Kuznetsov S.A., Zeifert L.L., Yashin V.D., Noskov Yu.S., Uvarov A.N., Fedak S.I., Gusev A.I., Vystavnoi S.A. (2000) Correlation of Magmatic and Metamorphic Complexes in the Western Part of the Altai-Sayan Fold Area. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN Publ., Branch "Geo", 118 p. (In Russ.)
- Simonov V.A. (1993) Petrogenesis of Ophiolites: Thermobarogeochemical Studies. Novosibirsk, 247 p. (In Russ.) (*Tr. OIGGiM*).
- Simonov V.A., Chernyshov A.I., Kotlyarov A.V. (2022) Mineralogy and Genesis of the Ultramafic Rocks of the Kortushibinsky Ophiolite Belt (Western Sayan). *Mineralogiya*, **8**(2), 49-62. (In Russ.)
- Simonov V.A., Chernyshov A.I., Kotlyarov A.V. (2020) Physicochemical parameters of ultramafic rock formation in the ophiolites of the Kuznetsk Alatau. *Geosfernye Issledovaniya*, (1), 34-49. (In Russ.)
- Simonov V.A., Dobretsov N.L., Buslov M.M. (1995) Boninite series in structures of the Paleo-Asian Ocean. *Russ. Geol. Geophys.*, **36**(7-8), 77-93 (translated from *Geol. Geofiz.*, (1994), **35**, 182-199).
- Simonov V.A., Kotlyarov A.V., Kulikova A.V. (2024) Formation Conditions of Paleo-Oceanic Complexes in the Altai-Sayan Fold Area. Novosibirsk, Sib. Otd-e RAN Publ., 309 p. (In Russ.) <https://doi.org/10.53954/9785605099505>
- Simonov V.A., Kulikova A.V., Kotlyarov A.V., Kolotilina T.B. (2021) Paleogeodynamics of magmatic and metamorphic processes in the formation of ultramafic rocks of the Chagan-Uzun Massif (ophiolites of Gorny Altai). *Geodyn. Tectonophys.*, **12**, 826-850. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-4-0557>
- Simonov V.A., Safonova I.Yu., Kovyazin S.V. (2010) Petrogenesis of island-arc complexes of the Chara Zone, Eastern Kazakhstan. *Petrologiya*, **18**, 59-72. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0869591110010045>
- Simonov V.A., Stupakov S.I., Loskutov I.Yu., Kovyazin S.V. (2000) Paleogeodynamic conditions of formation of the Kuznetsk Alatau ophiolites. *Russ. Geol. Geophys.*, **41**(12), 1690-1701 (translated from *Geol. Geofiz.*, (1999), **40**, 1759-1771).
- Sklyarov E.V., Kovach V.P., Kotov A.B., Kuz'michev A.B., Lavrenchuk A.V., Perelyaev V.I., Shchipansky A.A. (2016) Boninites and ophiolites: Problems of their relation and petrogenesis of boninites. *Russ. Geol. Geophys.*, **57**(1), 127-140 (translated from *Geol. Geofiz.*, **57**(1), 163-180). <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.009>
- Sláma J., Košler J., Condon D.J., Crowley J.L., Gerdes A., Hanchar J.M., Horstwood M.S.A., Morris G.A., Nasdala L., Norberg N., Schaltegger U., Schoene B., Tubrett M.N., Whitehouse M.J. (2008) Plešovice zircon – A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chem. Geol.*, **249**, 1-35. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.11.005>
- Stepanov A.S., Rubatto D., Hermann J., Korsakov A.V. (2016) Contrasting PT paths within the Barchi-Kol UHP terrain (Kokchetav Complex): Implications for subduction and exhumation of continental crust. *Amer. Miner.*, **101**, 788-807. <https://doi.org/10.2138/am-2016-5454>
- Stern R.J., Reagan M., Ishizuka O., Ohara Y., Whattam S. (2012) To understand subduction initiation, study forearc crust: To understand forearc crust, study ophiolites. *Litosfera*, (4), 469-483. (In Russ.)
- Sun S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, **42**, 313-345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Szymanowski D., Fehr M.A., Guillong M., Coble M.A., Wotzlaw J.-F., Nasdala L., Ellis B.S., Bachmann O., Schönbächler M. (2018) Isotope-dilution anchoring of zircon reference materials for accurate Ti-in-zircon thermometry. *Chem. Geol.*, **481**, 146-154. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.02.001>
- Terekhov E.N. (2004) The Problem of the Origin of Felsic Rocks with a Positive Eu Anomaly as Indicators of Extension: Evidence from the Eastern Baltic Shield. *Dokl. Earth Sci.*, **397**(6), 851-855 (translated from *Dokl. RAN*, **397**(5), 675-679).
- Tokarev V.N., Kurtigeshev V.S., Efremova N.M. (2019a) State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200,000 (2nd ed.). Kuzbass Series. Sheet N-45-XX-VI (Tselinnoe): Explanatory Note*. Moscow, Moscow Branch of VSEGEI. (In Russ.)
- Tokarev V.N., Shatilova G.A., Kotik O.P. (2002) State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200,000 (2nd ed.). Kuzbass Series. Sheet N-45-XIV (Gur'evsk): Explanatory Note*. St.Petersburg, Cartographic Factory of VSEGEI. (In Russ.)
- Tokarev V.N., Yur'ev A.A., Kosyakova L.N., Glaas G.A. (2019b) State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200,000 (2nd ed.). Kuzbass Series. Sheet N-

- 45-XXI (Prokopenvsk): Explanatory Note*. St.Petersburg, Cartographic Factory of VSEGEI. (In Russ.)
- Torabi G., Morishita T., Arai S. (2019) Two Types of Plagiogranite from Mesozoic Ashin Ophiolite (Central Iran): a mark of tectonic setting change from Jurassic to Cretaceous. *Geotectonics*, **53**(1), 110-124.
- Vetrova N.I., Vetrov E.V. (2024) Synchronous felsic volcanism and carbonate sedimentation as a setting for VMS deposits localization at the Salair terrane, NE Central Asian Orogenic Belt. *Gondw. Res.*, **136**, 53-72. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2024.08.014>
- Vetrova N.I., Vetrov E.V., Letnikova E.F. (2022) Petrological model for the formation of acid volcanites of the Pecherkina Formation (northwestern part of the Salair Ridge). *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta, Nauki o Zemle*, **67**(4), 591-613. (In Russ.) <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.404>
- Vetrova N.I., Vetrov E.V., Letnikova E.F., Soloshenko N.G. (2022) Age of the Kinterep formation of the Northwestern Salair: chemostratigraphy and U-Pb zircon dating. *Geodyn. Tectonophys.* <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0597>
- Wakita K. (2015) OPS mélange: a new term for mélanges of convergent margins of the world. *Int. Geol. Rev.*, **57**, 529-539. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.949312>
- Windley B.F., Alexeiev D., Xiao W., Kröner A., Badarch G. (2007) Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *J. Geol. Soc.*, **164**, 31-47. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-022>
- Zhimulev F.I., Gillespie J., Glorie S., Jepsen G., Vetrov E.V., De Grave J. (2020) Tectonic history of the Kolyvan-Tomsk folded zone (KTFZ), Russia: Insight from zircon U/Pb geochronology and Nd isotopes. *Geol. J.*, **55**, 1913-1930. <https://doi.org/10.1002/gj.3679>
- Zhimulev F.I., Kotlyarov A.V., Travin A.V., Fidler M.A., Khuurak A.A. (2024) The Shalap mélange of the Alambay Salair ophiolite zone (north-west of the Central Asian orogenic belt), geological structure and features of the amphibolites and greenstone basalt composition. *Geodyn. Tectonophys.*, **15**, 0757. <https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-3-0757>
- Zhimulev F.I., Kotlyarov A.V., Fidler M.A., Bekhterev N.A. (2025) Composition, geological structure and formation model of the subduction melange of the Alambay melange zone of Salair (northwest Central Asian Orogenic Belt). *Russ. Geol. Geophys.*, **66**(10), 1231-1256. <https://doi.org/10.15372/GiG2025138>
- Zhimulev F.I., Pospeeva E.V., Novikov I.S., Potapov V.V. (2021) Deep structure of the Salair fold-nappe terrane (NW CAO) according to magnetotelluric sounding. *Geodyn. Tectonophys.*, **12**, 125-138. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-1-0517>
- Zhimulev F.I., Pospeeva E.V., Potapov V.V., Novikov I.S., Kotlyarov A.V. (2023) Salair-Gornaya Shoria Junction (Northwestern Central Asian Orogenic Belt): Deep Structure and Tectonics from Magnetotelluric Data. *Russ. Geol. Geophys.*, **64**(6), 558-570 (translated from *Geol. Geofiz.*, **64**, 674-690). <https://doi.org/10.2113/RGG20224479>
- Zhu M., Pastor-Galán D., Smit M.A., Miao L., Dong M., Zhang F., Sanchir D., Ganbat A., Liu C., Luo Y., Li S. (2024) Ophiolites in the Central Asian Orogenic Belt record Cambrian subduction initiation processes. *Commun. Earth Environ.*, **5**, 753. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01905-7>
- Zindobryi V.D., Buslov M.M., Kotlyarov A.V. (2025) New data on the age and composition of ophiolites from the Kabak-Taiga massif (Gorny Altai). *Geodyn. Tectonophys.*, **16**(2), 0814. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-2-0814>
- Zonenshain L.P. (1976) Reconstruction of Paleozoic oceans. *Continental Drift*. Moscow, Nauka Publ., 28-71. (In Russ.)
- Zonenshain L.P., Kuz'min M.I., Natapov L.M. (1990) Plate Tectonics of the USSR Territory: In 2 v. Moscow, Nedra Publ. V. 1, 328 p. (In Russ.)