

УДК 550.42

**ИСТОЧНИКИ СНОСА ПАЛЕОЗОЙСКИХ ТЕРРИГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
ЯМКУНСКОЙ СЕРИИ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ АРГУНСКОГО
КОНТИНЕНТАЛЬНОГО МАССИВА (ЦЕНТРАЛЬНО-АЗИАТСКИЙ СКЛАДЧАТЫЙ
ПОЯС): ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И РЕЗУЛЬТАТЫ U–Th–Pb (LA-ICP-
MS) ДАТИРОВАНИЯ ОБЛОМОЧНОГО ЦИРКОНА¹**

Ю. Н. Смирнова^{1,*}, А. В. Куриленко^{2,3}, В. Б. Хубанов⁴

¹*Институт геологии и природопользования ДВО РАН, Благовещенск, Россия*

²*Всероссийский научно-исследовательский геологический институт А.П. Карпинского,
Санкт-Петербург, Россия*

³*Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, Улан-Удэ, Россия*

⁴*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия*

**e-mail: smirnova@ascnet.ru*

Поступила в редакцию 29.05.2025 г.

После доработки 25.07.2025 г.

Принята к публикации 12.12.2025 г.

Приведены результаты исследований геохимического состава терригенных отложений нижне-среднедевонской ильди́канской и нижнекаменноугольной газимурозаводской свит ямкунской серии Аргунского массива (Центрально-Азиатский складчатый пояс), а также данные U–Th–Pb датирования обломочного циркона из них. Геохимические особенности изученных пород свидетельствуют о том, что в области сноса присутствовали породы первого цикла седиментации. Вариации породообразующих компонентов и микроэлементов в терригенных отложениях ильди́канской и газимурозаводской свит позволяют предполагать, что основными источниками исходного материала послужили магматические образования кислого и среднего состава. В породах изученных свит преобладают обломочные зерна циркона раннепалеозойского и неопротерозойского возраста. В алевролите и песчанике газимурозаводской свиты появляются более молодые средне- и позднепалеозойские зерна циркона. Морфологические особенности и геохимический состав кристаллов циркона из терригенных пород

¹ Электронные дополнительные материалы (ESM) для этой статьи доступны по ссылке <https://doi.org/...> для авторизованных пользователей.

ильдиканской и газимурозаводской свит указывают на то, что в области сноса присутствовали магматические и метаморфические образования. В качестве основных поставщиков кластического материала стоит рассматривать палеозойские и неопротерозойские гранитоиды и гранитогнейсы Аргунского континентального массива. Отсутствие зерен циркона среднепалеозойского возраста в терригенных отложениях ильдиканской свиты связано с тектоническим и вулканическим покоем, существовавшим до эйфеля на территории Аргунского массива. В то же время наличие значимой группы зерен циркона раннекаменноугольного возраста в отложениях газимурозаводской свиты свидетельствует об их накоплении на фоне активной магматической деятельности.

Ключевые слова: ильдиканская свита, газимурозаводская свита, геохимия, U–Pb данные, Аргунский массив

ВВЕДЕНИЕ

В восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса одной из крупных тектонических структур является Аргунский континентальный массив или супертеррейн (рис. 1а) (Парфенов и др., 2003; Ханчук, 2006; Гордиенко и др., 2019). На территории Восточного Забайкалья в раннем палеозое накапливались кембрийские терригенно-карбонатные отложения аргунской серии, вверх по разрезу сменяющиеся осадочными породами силурийской горнозерентуйской и раннедевонской макаровской толщ. Более молодые отложения представлены средне-верхнепалеозойскими терригенно-карбонатными породами ямкунской серии. В составе последней выделяются ильдиканская, яковлевская и газимурозаводская свиты (рис. 2).

Проведенные в последние годы комплексные минералого-петрографические, геохимические исследования отложений аргунской серии, а также изотопное (U–Pb, LA-ICP-MS) датирование циркона из них позволили выявить основные источники сноса кластического материала и уточнить нижнюю возрастную границу их накопления (Смирнова и др., 2023, 2024). В данной публикации приведены результаты исследований геохимического состава пород ильдиканской и газимурозаводской свит ямкунской серии, а также U–Pb датирования детритового циркона из них с целью реконструкции основных источников сноса обломочного материала.

Объектом исследований являлись алевролиты ниже-среднедевонской ильдиканской свиты, песчаники и песчанистые алевролиты нижекаменноугольной газимурозаводской свиты ямкунской серии. Алевролиты ильдиканской свиты (обр. Ю-189) были отобраны в

Рис. 1

Рис. 2

районе горы Военная Сопка на левом берегу р. Донинская Борзя (50°57'40.5" с.ш., 118°41'57.3" в.д.), песчаники (обр. Ю-182) и песчанистые алевролиты (обр. Ю-184) газимурозаводской свиты – на правом берегу р. Газимур (51°30'54.9" с.ш., 118°20'27.7" в.д. и 51°30'27.4" с.ш., 118°20'11.5" в.д. соответственно). Места отбора образцов приведены на рис. 1б, 1в.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Девонские отложения Аргунского континентального массива представлены всеми тремя отделами. Самые древние, пограничные пржидольско-лохковские осадочные образования отнесены к *макаровской толще*, которая закартирована в восточной части Аргунского континентального массива, на правобережье р. Онон, от устья р. Макарова до верховьев р. Урульга, а также на правобережье р. Унда и в приустьевой части р. Нерча, где ею сложены тектонические блоки или ксенолиты среди гранитоидов ундинского комплекса перми и динамометаморфитов среднепалеозойского агинско-борщовочного комплекса (Куриленко и др., 1999; Шивохин и др., 2010; Рутштейн и др., 2015). Контакты макаровской толщи с более древними породами тектонические.

Наиболее полный разрез толщи общей мощностью 1300–1600 м находится в бассейне р. Макарова. Верхи его уничтожены интрузией гранитоидов ундинского комплекса. Толща здесь расчленена на две подтолщи: нижнюю существенно алевропелитовую и верхнюю карбонатно-песчаниковую (Рутштейн и др., 2015). В низах разреза закартирован слой аргиллитов мощностью около 100 м, в котором присутствуют прослои кварцитовидных песчаников и мелко-среднегалечных конгломератов, галька которых состоит из кварцитов. По мнению И. Г. Рутштейна, слой близок к стратиграфическому основанию толщи, о чем можно судить по составу псефитов, в которых преобладают породы подстилающего раннекарельского урульгинского метаморфического комплекса. Нарастает разрез пачкой переслаивания песчаников и аргиллитов, в низах которой залегает олистостромовый горизонт протяженностью около 5 км и мощностью до 70–100 м, также состоящий из материала разрушения пород урульгинского комплекса – кварцитов, диафторированных амфиболитов, слюдистых сланцев. Олистоплаки достигают 30–50 м в длину и соседствуют с кварцевыми конгломератами, гравелитами и песчаниками. Обломочный материал тектонически развальцован в плоскости напластования. Еще выше расположена 500–600-метровая пачка черных сланцеватых углистых, кремнистых аргиллитов и алевролитов с линзовидными прослоями полимиктовых песчаников. К этой пачке приурочены находки многочисленных отпечатков дискретных фрагментов стеблей и чашечек криноидей, все

определимые остатки которых принадлежат видам *Scyphocrinites mariannae* Yakovlev и *Mediocrinus aff. medius* Yeltyschewa. Находки пелагических криноидей рода *Scyphocrinites* широко известны во многих регионах мира на границе силура и девона, поэтому достаточно уверенно свидетельствуют в пользу позднепржидольско–раннелохковского возраста вмещающих отложений. Далее обнажаются известковистые алевролиты и аргиллиты (100–200 м) с маломощными (до нескольких метров) прослоями серых и почти черных известняков. В описанном слое определены криноидеи *Mediocrinus medius* Yeltyschewa, *Tolenicrinus lenticularis* (Stukalina), *Costatocrinus bicostatus* (Stukalina), *Anthinocrinus radialis* Stukalina, *Tastjicrinus paucicostatus* (Yeltyschewa), характерные для нижнего–среднего лохкова Центрального и Восточного Казахстана (Куриленко и др., 2002).

Два стратиграфических уровня с аналогичными комплексами морских лилий встречены и в низах большеверской свиты нижнего девона Верхнего Приамурья, где наблюдается ее непосредственное залегание на омутнинской свите силура. Обнаруженные совместно с криноидеями во втором фаунистическом горизонте большеверской свиты брахиоподы также свидетельствуют о лоховском возрасте вмещающих пород (Куриленко и др., 2002; Kurilenko, Kulikov, 2008). Мощность нижней подтолщи 800–1100 м.

Верхнемакаровская подтолща распространена на водоразделе рек Макарова и Теленгуй, в ядрах синклинальных структур. В нижней части она представлена известковистыми среднезернистыми песчаниками (100–200 м) с прослоями рассланцованных известковистых, кремнистых аргиллитов и алевролитов, а также серых преимущественно песчанистых известняков. Выше находится пачка переслаивания песчаников, известковистых и кремнистых аргиллитов с редкими прослоями и линзами известняков и единичными тонкими линзами гравелитов. Мощность существенно песчаниковой подтолщи около 500 м.

Ильдиканская свита, представляющая нижнюю часть ямкунской серии, выделена Е.В. Павловским и И.В. Лучицким в 1938 г. Она встречается в мелких тектонических блоках в бассейне р. Газимур по падям Ильдикан, Мистурная, Мостовка, Таловка, в окрестностях пос. Нерчинский Завод на горе Благодатская. Кроме того, к стратону условно отнесены выходы в бассейне среднего течения р. Унда, на левобережье верховьев р. Урулюнгуй и в бассейне р. Донинская Борзя. Свита сложена известковистыми доломитами, известняками, мергелями с пачками аргиллитов и алевролитов, переходящими в песчанистые разности. Полная мощность свиты оценивается в 850–1000 м. В известняках ильдиканской свиты на правобережье р. Ильдикан обнаружены остатки криноидей *Amazaricrinus ildicanensis* Kurilenko, *Kuzbassocrinus decemlobatus* Yeltyschewa, *Pandocrinus grandis* Kurilenko; брахиопод

Douvillina cf. *orientalis* (Janov et Modzalevskaia), *Isorthis* cf. *quadrata* Alekseeva; трилобитов, близких к *Paciphacops* (P.) *logani asiaticus* Maximova; кораллов *Riphaeolites ramosus* Yanet, *R. virgosus* Yanet, *Favosites porfirievi* Tchernychev var. *oldoica* J. Dubatolova, *Lyriellasma denticulata* Zheltonogova. Определенные криноидеи и брахиоподы позволяют сделать вывод о пражском возрасте разреза, а кораллы и трилобиты датируют местонахождение в более широком временном интервале – прага–ранний эмс. Комплекс фауны хорошо коррелируется с таковым средней части большеверской свиты Верхнего Приамурья (Куриленко, 2001). На левом борту пади Мистурная собраны криноидеи *Vasticrinus vastus* (Yeltyschewa et J. Dubatolova), *Raricrinus minimus* (Yeltyschewa et J. Dubatolova), *Pandocrinus grandis* Kurilenko, *Hexacrinites?* *biconcavus* Yeltyschewa et J. Dubatolova, *H.?* *mamillatus* Yeltyschewa et J. Dubatolova, *Graptocrinus incelebratus* (Yeltyschewa et J. Dubatolova), *Schyschkatocrinus consuetus* J. Dubatolova, *Amurocrinus conserratus* (Yeltyschewa et J. Dubatolova), *Pesticrinus* sp. и брахиоподы *Cyrtinopsis nalivkini* (Ržonsnickaja), *Zdimir?* sp. Комплекс фауны свидетельствует об эйфельском возрасте пород и обнаруживает черты сходства с фаунистической ассоциацией верхней части имачинской свиты Верхнего Приамурья (Куриленко, 2001; Куриленко и др., 2002). Таким образом, в стратотипической местности в ильдижанской свите присутствуют два разновозрастных фаунистических горизонта. Один из них соответствует пражскому ярусу, другой эйфельскому.

Яковлевская свита впервые была выделена И.Н. Тихомировым и Н.В. Шталь в 1957 г. в Среднем Пригазимиурье по пади Котиха. В стратотипической местности отложения стратона согласно залегают на ильдижанской свите и перекрываются турне-нижневизейской газимурозаводской свитой. Яковлевская свита представлена аргиллитами, алевролитами, реже аркозовыми и полимиктовыми песчаниками, гравелитами, известняками. Мощность ее достигает 1700 м. В нижней части свиты выявлены криноидеи *Ononicrinus gracilis* (Yeltyschewa et J. Dubatolova), *Amurocrinus imatschensis* (Yeltyschewa et J. Dubatolova), *Platystela* sp. и брахиоподы *Mucrospirifer mucronatus* (Conrad), *?Athyris concentrica* (Buch), которые свидетельствуют о живетском возрасте отложений (Куриленко и др., 2002). В средней части разреза в алевролитах содержатся остатки брахиопод *Quadrithyrina petita* Kulkov, криноидей *Asperocrinus paucus* Kurilenko, *Urushicrinus parvulus* Kurilenko, *Hexacrinites?* *stukalinae* Kurilenko, *Ononicrinus delicatus* (Moore et Jeffords), указывающие на раннефранский возраст вмещающих отложений. Верхняя часть разреза включает брахиоподы *Camarotoechia asiatica* Sokolskaja, *Cyrtospirifer verneuili* (Murchison), *C. cf. sulcifer* (Hall et Clarke), *Sphenospira julii* (Dehee); криноидеи *Platycrinites?* *subtuberosus* Stukalina, *Pentaridica pulcher* (Yeltyschewa), *Asperocrinus* sp. и др. (Котляр и др., 1990; Куриленко, 2000)

и мшанковый комплекс *Cyclotrypa arboracea* Nekhoroshev, *Crustopora irregularis* (Nekhoroshev), *Pseudobatostomella longipora* Nekhoroshev, *Fenestella guadrulla* Nekhoroshev и др. (Попеко, 2000), типичный для отложений верхнего фамена.

Завершающая разрез палеозойских терригенных отложений Аргунского массива карбонатно-терригенная *газимурозаводская свита*, выделенная И.Н. Тихомировым в 1960 г., закартирована в небольших разрозненных выходах в бассейне среднего течения р. Газимур на правом берегу пади Малая Кулинда, по р. Котиха, а также на левобережье р. Онон в районе хр. Аргалей, в бассейне р. Унда и в районе Ононского хребта. На песчаниках яковлевской свиты согласно залегают известняки, полимиктовые и аркозовые песчаники, алевролиты и аргиллиты с горизонтами туффитов. Общая мощность свиты 240 м (Озерский и др., 2001). Газимурозаводская свита охарактеризована фаунистическими комплексами трех региональных горизонтов: павловского, ямкунского и кулиндинского (Куриленко и др., 2002).

Павловский горизонт отвечает нижнетурнейскому подъярису. Наиболее распространенными видами в горизонте являются: брахиоподы *Leptogonia analoga* (Phillips), *Plicochonetes glenparkensis* Weller, *Torynifer cooperensis* (Swallow); мшанки *Lioclema tubulosa* Nekhoroshev, *Neotrematopora nurensis* Popeko, *Raissiella bystrensis* Popeko, *Pseudobatostomella minima* (Nekhoroshev); криноидеи *Platycrinites? oleinikovi* Kurilenko, Pl.? *kleninae* Stukalina, Pl.? *subtuberosus* Stukalina, Pl.? *gazimuricus* Kurilenko, *Floricyclus* cf. *kazangapicus* Sisova и др. Фаунистический комплекс горизонта чрезвычайно близок к раннетурнейским комплексам Кузбасса, Казахстана и Рудного Алтая.

Ямкунский горизонт соответствует верхнетурнейскому подъярису. Нижняя граница фиксируется по появлению характерных видов, среди которых наиболее многочисленны брахиоподы *Rugosochonetes hardensis* (Phillips), *R. nalivkini* Monachova, *Tolmatchoffia robusta* (Tolmatchew), *Marginatia deruptoides* Sarytcheva; мшанки *Rhombopora simplex* Trizna, *R. exigua* Ulrich, *Rectifenestella serratula* (Ulrich), *Polypora zvonkovaе* Popeko; криноидеи *Platycrinites? smirnovae* Kurilenko, Pl.? *kotikhensis* Kurilenko, *Pentaridica carbonica* (Yeltyschewa) и др. Большинство видов характерно для верхнетурнейского подъяруса Казахстана, Рудного Алтая, Кузбасса и Верхоянья.

Кулиндинский горизонт относится к нижневизейскому подъярису. Нижняя граница проводится по появлению характерных видов, наиболее многочисленными из которых являются брахиоподы *Streptorhynchus ruginosum* (Hall), *Orthotes keokuk* Hall, *Chonetes ischimicus* Nalivkin, *Keokukia sulcata* Carter, *Rotaia sibirica* (Rotai), *Tomioopsis plicata* Monachova; мшанки *Sulcoretepora minor* Nekhoroshev, *S. zigzag* Nekhoroshev, *S. altaica*

Nekhoroshev, Megacanthopora altaica (Nekhoroshev), *Nikiforovella ulbensis* Nekhoroshev; криноидеи *Ungulicrinus unguliformis* Kurilenko, *Platycrinites? altaicus* Stukalina, *Pentaridica urkaensis* (Yeltyschewa). Преобладающее число видов комплекса широко распространено в нижневизейских отложениях Кузбасса, Казахстана, Рудного Алтая и Сибири (Куриленко и др., 2002).

Чрезвычайно важным является согласное залегание газимурозаводской свиты на яковлевской, верхние слои которой выделены в зону *Sphenospira julii*–*Avonia inflata* (Котляр и др., 1990). Восточное Забайкалье является единственным районом в пределах всей Монголо-Охотской области и прилегающих территорий, где наблюдается непрерывный фаунистически охарактеризованный переход от девона к карбону (Шивохин и др., 2010).

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДИКИ

Петрографические особенности пород были изучены с помощью поляризационного микроскопа Axio Scope A1, оснащенного цифровой камерой Axio CAM 1 CC3. При типизации осадочных пород ямкунской серии по размеру обломочного материала использовалась классификация, предложенная В.Г. Кузнецовым (2007).

Содержания петрогенных компонентов в терригенных отложениях определены рентгенофлуоресцентным методом в Центре коллективного пользования “Амурского центра минералого-геохимических исследований” Института геологии и природопользования ДВО РАН (ИГиП ДВО РАН, Благовещенск) на рентгеновском спектрометре Lab Center XRF-180. Подробно методика проведения рентгенофлуоресцентного анализа приведена в публикации (Segrenev, Prots, 2024).

Микроэлементный состав пород был изучен в лаборатории аналитической химии Центра коллективного пользования Дальневосточного геологического института Дальневосточного отделения Российской академии наук (ДВГИ ДВО РАН, Владивосток) на квадрупольном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) Agilent 7500с (Agilent Technologies, Япония), оборудованном распылителем Бабингтона, охлаждаемой распылительной камерой Скотта и заземленной горелкой Фассела. Настройку прибора проводили по специальному раствору, содержащему 10 мкг/дм³ лития, кобальта, иттрия, церия и таллия (Agilent Technologies, США), таким образом, чтобы достичь максимальной чувствительности при минимальном значении уровня образования ионов оксидов и двузарядных ионов.

Химическая пробоподготовка при выполнении ICP-MS заключалась первоначально в смешивании анализируемого образца с метаборатом лития в соотношении 1 : 3 в платиновом

тигле для образования раствора. Затем полученный раствор помещали в холодную муфельную печь и нагревали до 1050°C. Сплавление при этой температуре вели в течение 15 мин. Полученные плавы растворяли в 5%-ной HNO₃. Далее растворы упаривали с добавлением плавиковой кислоты для удаления избытка кремния и бора до влажных солей. Осадки обрабатывали 20%-ной HNO₃ с добавлением следов HF для предотвращения возможного гидролиза и полимеризации высокозарядных ионов элементов Zr, Nb, Hf, Ta, а также Mo и W. После этого растворы переносили в мерные полипропиленовые колбы вместимостью 50 см³ и доводили их до метки деионизированной водой (тип I). Для масс-спектрометрического с индуктивно связанной плазмой измерения проводили дополнительное разбавление растворов образцов в 5 раз 4%-ной HNO₃ в полипропиленовых пробирках для снижения солевого фона. Во все растворы предварительно перед анализом добавляли внутренний стандарт In при конечной концентрации в растворе 10 мкг/дм³. Геохимический состав осадочных пород ильдижанской и газимурозаводской свит ямкунской серии Аргунского массива приведен в ESM_табл. 1.

Выделение зерен циркона выполнено в минералогической лаборатории ИГиП ДВО РАН с применением тяжелых жидкостей. Характеристика внутреннего строения и выбор места для локального датирования осуществлялись на основании изучения зерен циркона в проходящем свете, а также в режиме катодолюминесценции. Катодолюминесцентные (CL) изображения получены в Центре коллективного пользования Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ЦКП ИФЗ РАН, Москва) (Веселовский и др., 2022) с помощью сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA IVL MS, оснащенного панхроматическим CL-детектором с широким спектральным диапазоном (185–850 нм), при ускоряющем напряжении 10 кВ и токе пучка электронов 3 нА.

Изотопные U–Pb исследования зерен циркона проведены методом LA-ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7900, соединенном с приставкой для лазерного пробоотбора ESL NWR-213 с длиной волны излучения 213 нм в ЦКП ИФЗ РАН. Диаметр лазерного пучка составлял 35 мкм при плотности энергии ~2–3 Дж/см². Время измерения в одной точке 70 с, из которых 20 с – разогрев лазера и замер фона, 30 с – лазерное испарение и масс-спектрометрическое измерение пробы и 20 с – продувка камеры лазерного пробоотбора. Учитывались следующие массы (изотопы): ²⁰²Hg и ²⁰⁴(Hg+Pb) (время регистрации по 1 мс), ²⁰⁶Pb (15 мс), ²⁰⁷Pb (30 мс), ²⁰⁸Pb и ²³²Th (по 3 мс), ²³⁸U (10 мс). В качестве внешнего стандарта использовался эталонный циркон Harvard 91500 (1065 млн лет; Wiedenbeck et al., 1995), в качестве контрольных образцов – зерна циркона Plešovice (337 млн лет; Sláma et al., 2008) и GJ-1 (600 млн лет; Jackson et al., 2004). Относительные погрешности

изотопных отношений в контрольных образцах варьировали в пределах: 1.5–5% для $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$, 1.5–3% для $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ и $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, 1–2% для $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$. Значения средневзвешенных возрастов эталонов циркона составляли: для GJ-1 – 616 ± 27 млн лет по отношению $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, 603 ± 4 млн лет по $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, 606 ± 6 млн лет по $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$; для Plešovice – 365 ± 30 , 339 ± 2 и 342 ± 4 млн лет соответственно. Обработка изотопных данных и расчет возрастов проводились в программах GLITTER (Griffin et al., 2008), ISOPLLOT (Ludwig, 2008) и IsoplotR (Vermeesch, 2018). Поправка на нерадиоогенный свинец не проводилась. Дискордантность (D) вычислялась по формулам (Powerman et al., 2021): $D = (100 \times (^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}_{\text{возраст}} / ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}_{\text{возраст}}) - 1)$ для зерен циркона моложе 1 млрд лет и $D = (100 \times (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}_{\text{возраст}} / ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}_{\text{возраст}}) - 1)$ для зерен циркона древнее 1 млрд лет. Для построения кривой относительной вероятности возрастов циркона и вычисления ее максимумов использовались только те значения возрастов, погрешности определения которых не превышают 3% для отношений $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$, а дискордантность составляет менее 10%. Такой подход согласуется с рекомендациями в работе (Gehrels, 2012), где для фильтрации данных предложено использовать значения коэффициента дискордантности в диапазоне 10–30%. Пики для кривой относительной вероятности возрастов циркона рассчитаны с помощью программы AgePick (Gehrels, 2007). Для построения кумулятивных кривых изотопных возрастов детритового циркона использовалась программа IsoplotR (Vermeesch, 2018).

ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОД

Алевролиты ильдижанской свиты буровато-серого и серого цвета, с грубой алевритовой структурой и массивной текстурой. Обломки имеют слабоокатанную и окатанную форму, размером от 0.05 до 0.10 мм, редко до 0.30 мм. Среди них преобладают кварц, часто трещиноватый (50–69%), и полевые шпаты (до 20%). Содержания чешуек биотита и мусковита в алевролитах варьирует от 11 до 30%. Единичны обломки вулканитов кислого состава. Цемент базального типа кремнисто-глинистого состава. Акцессорные минералы представлены гётитом, цирконом, гранатом и пиритом.

Песчанистые алевролиты газимурозаводской свиты темно-серого цвета, с текстурой взмучивания и алевропсаммитовой структурой. Они сложены слабоокатанными обломками размером от 0.05 до 0.20 мм. Среди обломков присутствуют вулканиты кислого состава, карбонаты и микрокварциты (42–60%), кварц (28–41%) и полевые шпаты (5–17%). Цемент

контактово-поровый кремнисто-глинистого состава и поровый карбонатного состава. Акцессорные минералы: циркон и гётит.

Песчаники газимурозаводской свиты серого цвета, с мелко-среднезернистой псаммитовой структурой и массивной текстурой. В них присутствуют слабоокатанные обломки размером от 0.10 до 0.40 мм, среди которых отмечаются кварц (24–38%), полевые шпаты (8–26 %) и различные по составу обломки пород (37–62%). Последние представлены слюдистыми, кварц-слюдистыми и углеродистыми сланцами, микрокварцитами и вулканитами кислого состава. В виде единичных чешуек встречается мусковит. Цемент кремнисто-глинистого состава контактово-порового типа. Акцессорные минералы: циркон, гётит и гранат.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОД

По содержанию породообразующих компонентов, лежащих в основе диаграммы $\text{Na}_2\text{O}-(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO})-\text{K}_2\text{O}$ (Blatt et al., 1972), алевролиты ильди́канской свиты локализуются вдоль линии, разделяющей лититовые породы и аркозы, тогда как песчаники и алевролиты газимурозаводской свиты расположены преимущественно в поле граувакк (рис. 3а). На классификационной диаграмме $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)-\log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ (Петтиджон и др., 1976) среди пород ямкунской серии выделяются следующие литотипы – аркозы, граувакки и литоидные арениты (рис. 3б).

Рис. 3

В алевролитах ильди́канской свиты суммарное содержание редкоземельных элементов изменяется от 123 до 331 мкг/г. В них отмечается преобладание легких редкоземельных элементов над тяжелыми ($[\text{La}/\text{Yb}]_n = 4.90-12.47$) при отчетливо проявленной отрицательной европиевой аномалии ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.48-0.69$) (рис. 4а).

Рис. 4

Наименьшие вариации лантаноидов типичны для алевролитов и песчаников газимурозаводской свиты ($\sum \text{REE} = 166-239$ мкг/г) при близких спектрах распределения редкоземельных элементов ($[\text{La}/\text{Yb}]_n = 8.03-13.15$) и отрицательной европиевой аномалии ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.49-0.77$) (рис. 4б, 4в).

В терригенных отложениях ильди́канской и газимурозаводской свит отмечаются близкие к коровым значения концентраций большинства микроэлементов при незначительном дефиците Nb (11–20 мкг/г), Ta (0.64–1.64 мкг/г), Sr (84–326 мкг/г) (рис. 5, ESM_табл. 1). В песчаниках и алевролитах газимурозаводской свиты стоит отметить дефицит Co (4–7 мкг/г), V (15–30 мкг/г), Ni (6–39 мкг/г) при обогащении Cr (124–432 мкг/г) (рис. 5б, 5в; ESM_табл. 1).

Рис. 5

Рис. 6

Для реконструкции состава и природы исходных пород разработана серия диаграмм, основанных на содержании и соотношении микроэлементов и породообразующих компонентов. Исходными образованиями, участвовавшим в осадконакоплении при формировании пород ильдижанской и газимурозаводской свит ямкунской серии Аргунского массива, согласно (рис. 6а), являлись нерестицированные осадки. Вероятными источниками сноса кластического материала, учитывая положение фигуративных точек состава терригенных отложений ильдижанской и газимурозаводской свит на диаграммах La/Sc–Th/Co (Cullers, 2002), Rb–K (Floyd, Leveridge, 1987), Th–La–Sc (Cullers, 2002), послужили магматические породы кислого и среднего состава (рис. 6б, 6в, 6г). Аналогичный вывод следует из анализа диаграмм A–C–Alk (Bavinton, 1981) и (CaO+MgO)–SiO₂/10–(Na₂O+K₂O) (Тейлор, Мак-Леннан, 1988) (рис. 6д, 6е).

Рис. 7

Кроме того, для реконструкции состава исходных пород было выполнено сравнение ряда соотношений микроэлементов в терригенных отложениях ильдижанской и газимурозаводской свит с геохимическими “эталоны”, предложенными К. Конди (Condie, 1993). Значения Th/Sc (0.69–0.98), La/Sc (1.23–3.22) и Cr/Zr (0.36–0.49) ниже в песчаниках ильдижанской свиты по сравнению с таковыми в алевролитах и песчаниках газимурозаводской свиты (Th/Sc = 1.11–2.48, La/Sc = 3.55–9.05 и Cr/Zr = 0.45–1.78). Тогда как величина Th/Cr (0.12–0.15) в алевролитах ильдижанской свиты выше, чем в отложениях газимурозаводской свиты (Th/Cr = 0.02–0.11). В целом изученные породы ямкунской серии тяготеют по значениям отношений Th/Sc и La/Sc к линиям состава фанерозойских гранитов и палеозойских андезитов (рис. 7а, 7б). Тогда как величины Cr/Zr и Th/Cr в терригенных отложениях ильдижанской и газимурозаводской свит близки к таковым в палеозойских андезитах и базальтах (рис. 7в, 7г).

РЕЗУЛЬТАТЫ U–Pb ДАТИРОВАНИЯ ЦИРКОНА

Рис. 8

Из алевролита ильдижанской свиты (обр. Ю-189) было выделено 116 зерен обломочного циркона. Из них 82 зерна характеризуются конкордантными оценками возраста (рис. 8а). Циркон представлен кристаллами призматической и дипирамидальной, реже изометричной формы, с секториальной, нарушенной концентрической, слабо выраженной и широкой зональностью. Их размер варьирует от 50 до 160 мкм, коэффициент удлинения до 5.00 (рис. 9). Края докембрийских кристаллов циркона главным образом окатаны. Значения Th/U в зернах изменяются в пределах 0.16–1.28 (ESM_табл. 2). Единичные кристаллы неопротерозойского возраста имеют низкие значения Th/U = 0.09. Наиболее молодые три зерна циркона характеризуются раннеордовикским возрастом (473 ± 8 млн лет). Значимая

Рис. 9

группа зерен циркона имеет кембрийский возраст (486–527 млн лет, 30 зерен) с пиком на кривой относительной вероятности возрастов ~513 млн лет (рис. 3а). Для 40 зерен выявлен неопротерозойский возраст (552–997 млн лет) с пиками на кривой относительной вероятности возрастов ~786, ~839 и ~910 млн лет. Мезопротерозойский (1105–1481 млн лет) и палеопротерозойский возраст (1750–2457 млн лет) типичен для 3 и 4 зерен детритового циркона соответственно. Для двух зерен циркона определен неоархейский возраст (~2557 и ~2631 млн лет).

Рис. 10

Из песчанистого алевролита газимурозаводской свиты (обр. Ю-184) всего было выделено 120 зерен детритового циркона. Конкордантные оценки получены для 57 зерен. Циркон представлен кристаллами размером от 40 до 125 мкм, дипирамидальной и призматической формы с коэффициентом удлинения до 3.00, реже изометричной формы (рис. 10). В кристаллах циркона отмечается секториальная, нарушенная концентрическая, широкая и слабая зональность. Величина Th/U в зернах варьирует от 0.27 до 1.85 (ESM_табл. 3). В единичных раннепалеозойских и неопротерозойских зернах значения Th/U ниже 0.20. Большая часть зерен циркона характеризуется палеозойским возрастом с пиками на кривой относительной вероятности возрастов ~359 и ~502 млн лет (рис. 9б). Раннекаменноугольные и средне-позднедевонские значения возраста получены для 43 зерен циркона (347–392 млн лет) с пиком на кривой относительной вероятности возрастов ~359 млн лет. Практически вся группа девонских зерен циркона, за исключением одного (Ю-184/64, 392 ± 5 млн лет), характеризуется позднедевонским возрастом (359–381 млн лет). В двух и четырех кристаллах циркона определен ранне-среднеордовикский (459 ± 6 млн лет; 471 ± 6 млн лет) и кембрийский (490–535 млн лет) возраст соответственно. Небольшое количество зерен циркона имеет неопротерозойский возраст (544–952 млн лет, 7 зерен) с пиком на кривой относительной вероятности возрастов ~834 млн лет. Лишь для одного зерна циркона выявлен мезопротерозойский возраст (1005 ± 10 млн лет).

Рис. 11

Из песчаника газимурозаводской свиты (обр. Ю-182) было проанализировано 117 зерен циркона. Конкордантные оценки возраста получены для 101 зерна циркона. Для 85 зерен циркона установлен палеозойский возраст. Циркон представлен кристаллами призматической, дипирамидальной и изометрической формы, с секториальной, нарушенной концентрической, широкой и пятнистой зональностью. Размер кристаллов циркона изменяется в пределах 50–220 мкм при коэффициенте удлинения до 3.6 (рис. 11). Значения отношения Th/U в зернах циркона составляют 0.24–2.27 (ESM_табл. 4). Для 59 зерен определен ранне-среднекаменноугольный возраст (336–358 млн лет) с пиком на кривой относительной вероятности возрастов ~349 млн лет (рис. 9в). Значительная часть зерен

циркона имеет девонский возраст (359–413 млн лет, 43 зерна) с пиком на кривой относительной вероятности возрастов ~380 млн лет. Небольшое количество зерен циркона характеризуется силурийским (422–443 млн лет, 5 зерен) и раннеордовикским (472–474 млн лет, 2 зерна) возрастами. Для 9 зерен циркона установлен кембрийский возраст (487–527 млн лет) с пиками на кривой относительной вероятности возрастов ~492 и ~510 млн лет. Докембрийские кристаллы встречаются в виде дипирамид и призм с коэффициентом удлинения до 2.36. Их размер изменяется от 120 до 170 мкм, значения Th/U варьируют в пределах 0.27–1.67 (ESM_табл. 4). Для 5 зерен установлен неопротерозойский возраст (541–948 млн лет) и лишь одно зерно имеет палеопротерозойский возраст (~2486 млн лет).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, впервые для терригенных пород ильдижанской и газимурозаводской свит ямкунской серии Аргунского континентального массива были проведены комплексные минералогические, геохимические и изотопные (U–Pb, LA-ICP-MS) исследования. Особенности распределения породообразующих компонентов и микроэлементов позволяют предполагать, что в области сноса доминировали породы первого цикла седиментации преимущественно кислого и среднего состава.

Рис. 12

Согласно результатам U–Pb датирования циркона выявлено значительное сходство в распределении его возраста для терригенных отложений ямкунской серии (рис. 8, 12). Так, на кривых относительной вероятности и кумулятивной кривой изотопных возрастов детритового циркона из терригенных отложений ямкунской серии наблюдается преобладание двух групп циркона палеозойского и неопротерозойского возраста. Единичные зерна циркона в изученных терригенных отложениях имеют более древний возраст.

Практически все зерна циркона из алевролита ильдижанской свиты, песчаника и песчанистого алевролита газимурозаводской свиты характеризуются значениями Th/U более 0.2, что свидетельствует о преобладании в области сноса магматических образований. Единичные зерна циркона в отложениях ильдижанской и газимурозаводской свит имеют значения Th/U ~0.1, что указывает на их метаморфическое происхождение (Vavra et al., 1999; Hartmann, Santos, 2004). Рассматривая морфологические особенности циркона из терригенных отложений ямкунской серии, стоит отметить различные виды зональности. Большинство зерен имеют секториальную зональность, которая характерна для магматических пород кислого состава. Кристаллы с широкой зональностью типичны для пород среднего состава (диоритов), а циркон с нарушенной концентрической зональностью роста и пятнистой структурой появляется при изменении магматического циркона в

результате метаморфических и метасоматических процессов (Corfu et al., 2003; Hartmann et al., 2000).

Три наиболее молодых зерна циркона в алевролите ильди́канской свиты характеризуются раннеордовикским возрастом (473 ± 8 млн лет). Исходя из этих данных, нижняя возрастная граница накопления терригенных отложений ильди́канской свиты соответствует раннему ордовику.

Нижняя возрастная граница накопления песчаников и алевролитов газимурозаводской свиты, согласно наиболее молодым пикам на кривых относительной вероятности возрастов (~ 349 и ~ 359 млн лет; рис. 8б, 8в) приходится на начало каменноугольного периода. Учитывая результаты палеонтологических исследований газимурозаводской свиты (Куриленко и др., 2002; Шивохин и др., 2010), наиболее вероятно, что изученные нами песчаники представляют кулиндинский горизонт, тогда как песчанистые алевролиты – ямкунский горизонт. Проводя корреляцию нижнекаменноугольных терригенных отложений газимурозаводской и типаринской свит Аргунского массива (рис. 13), отметим, что для палеозойской группы зерен циркона из этих свит, так же как и для неопротерозойских зерен, установлены близкие значения возраста, указывающие на единые источники сноса кластического материала.

Рис. 13

Учитывая накопленные геологические данные, можно сделать вывод, что основными поставщиками кластического материала, наиболее вероятно, являлись магматические образования Аргунского массива. Источниками наиболее молодой группы зерен циркона силурийского, девонского и раннекаменноугольного возраста, выявленной в терригенных отложениях газимурозаводской свиты, стоит рассматривать массивы гранитоидов (Сорокин и др., 2002; Sorokin, Kudryashov, 2004). Поставщиками наиболее многочисленных раннепалеозойских и неопротерозойских зерен циркона, обнаруженных во всех изученных образцах, вероятно, являлись раннепалеозойские кислые и средние по составу магматические породы (Сорокин и др., 2004; Sorokin et al., 2009; Wu et al., 2011, 2012; Liu et al., 2017; Li et al., 2018; Gou et al., 2019) и неопротерозойские магматические породы кислого и среднего состава, а также метаморфические образования (Голубев и др., 2010; Шивохин и др., 2010; Wu et al., 2011; Gou et al., 2013, 2019; Tang et al., 2013; Ge et al., 2015; Yang et al., 2017; Feng et al., 2018, 2022; Liu et al., 2020), выявленные в пределах Аргунского массива на территории как России, так и Китая.

Исходными породами для единичных зерен циркона палеопротерозойского и неоархейского возраста, по-видимому, были раннедокембрийские гранитогнейсы (~ 1.84

млрд лет; Feng et al., 2022), гнейсовые монцограниты (~2.61 млн лет; Shao et al., 2015) и биотит-роговообманковые гнейсы (~2.46 млрд лет; Hou et al., 2020) Аргунского массива.

Проведенные исследования позволяют сделать предварительные выводы, касающиеся геодинамической модели формирования палеозойских терригенно-карбонатных отложений ямкунской серии Аргунского континентального массива. Прежде всего, следует отметить, что изученные нами отложения ниже-среднедевонской ильдиканской свиты, залегающие в нижней части разреза ямкунской серии, представлены алевролитами, в составе которых преобладают среди обломков кварц и полевые шпаты. По геохимическому составу изученные образцы близки преимущественно к отложениям аркозового состава. Кроме того, возраст трех наиболее молодых зерен циркона из образца алевролита ильдиканской свиты раннеордовикский, при этом в нем отсутствуют зерна силурийского и ранне-среднедевонского возраста. Сравнивая терригенные отложения ильдиканской свиты с палеозойскими осадочными породами Ольдойского террейна, расположенного в северо-восточной части Аргунского массива (Сорокин и др., 2015), стоит отметить значительное сходство гистограмм распределения оценок возраста детритового циркона из алевролита ильдиканской свиты и песчаника силурийской омутнинской свиты (рис. 13). В то же время в песчанике средне-верхнедевонской ольдойской свиты одноименного террейна присутствует большое количество зерен девонского возраста. В этой связи не исключено, что накопление осадочных пород в пределах Аргунского массива в обстановке пассивной континентальной окраины могло происходить до эйфельского века девонского периода.

В то же время песчаники и алевролиты газимурозаводской свиты сложены обломками пород различного состава, в меньшем количестве присутствуют кварц и полевые шпаты. По геохимическому составу они близки к грауваккам. Соответствие возраста наиболее молодых зерен циркона из терригенных отложений газимурозаводской свиты принятому возрасту свиты в совокупности с присутствием прослоев туффитов в составе свиты свидетельствуют о вулканической активности в период накопления отложений и смене геодинамической обстановки. Значительное сходство гистограмм распределения оценок возраста зерен циркона из песчаника и алевролита газимурозаводской свиты и песчаника типаринской свиты Ольдойского террейна (рис. 13) позволяет предполагать, что они формировались в единых геодинамических обстановках, связанных с субдукционными процессами в период заложения Норовлинской окраинно-континентальной магматической дуги (Парфенов и др., 2003) или Онон-Норовлинской островной дуги (Гордиенко и др., 2019).

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Основными поставщиками исходного материала для терригенных отложений ильдижанской и газимурозаводской свит ямкунской серии, исходя из их минералогическо-геохимических особенностей, послужили нерестицированные породы, а именно магматические породы кислого и среднего состава.
2. Согласно результатам U–Pb датирования циркона источниками сноса кластического материала для отложений ямкунской серии являлись породы раннепалеозойского и неопротерозойского возраста. Дополнительными (новыми) исходными образованиями при накоплении отложений газимурозаводской свиты были средне- и позднепалеозойские породы.
3. Исходя из геологической ситуации, материнскими породами могли быть магматические образования кислого и среднего состава, а также метаморфические породы Аргунского массива.
4. Возраст наиболее молодой группы зерен циркона из алевролитов ильдижанской свиты раннеордовикский (473 ± 8 млн лет). Отсутствие зерен циркона ранне-среднедевонского возраста в них свидетельствует о формировании отложений в обстановке тектонического и вулканического покоя.
5. Нижняя возрастная граница накопления песчаных алевролитов и песчаников газимурозаводской свиты составляет ~359 и ~349 млн лет соответственно. Полученные значения возраста соответствуют принятому возрасту свиты. Эти данные в совокупности с присутствием в составе свиты горизонтов туффитов указывают на то, что их накопление происходило на фоне вулканической деятельности.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам А.Б. Котову и В.П. Ковачу за ценные советы и замечания. Авторы благодарят сотрудников ЦКП “Амурского центра минералогическо-геохимических исследований” ИГиП ДВО РАН А.С. Сегренёва, Е.В. Ушакову, Е.Н. Воропаеву, О.Г. Медведеву и сотрудников лаборатории аналитической химии ЦКП ДВГИ ДВО РАН Н.В. Зарубину, Д.С. Остапенко.

Источники финансирования. Исследования выполнены в рамках фундаментальных исследований ИГиП ДВО РАН (№ 122041800127-8 “Геодинамические обстановки, основные этапы тектонической эволюции и металлогения восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса”) и государственного задания ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Веселовский Р.В., Дубиня Н.В., Пономарёв А.В., Фокин И.В., Патонин А.В., Пасенко А.М., Фетисова А.М., Матвеев М.А., Афиногенова Н.А., Рудько Д.В., Чистякова А.В. Центр коллективного пользования Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН “Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм” // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. 0579.

Голубев В.Н., Чернышев И.В., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Гольцман Ю.В., Баирова Э.Д., Яковлева С.З. Стрельцовский урановорудный район: изотопно-геохронологическая (U–Pb, Rb–Sr и Sm–Nd) характеристика гранитоидов и их место в истории формирования урановых месторождений // Геология рудных месторождений. 2010. Т. 52. № 6. С. 553–571.

Гордиенко И.В., Метелкин Д.В., Ветлужских Л.И. Строение Монголо-Охотского складчатого пояса и проблема выделения Амурского микроконтинента // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 3. С. 318–341.

Котляр Г.В., Попеко Л.И., Барабашева Е.Е., Куриленко А.В. Региональные стратиграфические подразделения каменноугольных отложений Забайкалья // Стратиграфия докембрия и фанерозоя Забайкалья и Юга Дальнего Востока. Тезисы докладов IV Дальневосточного регионального межведомственного стратиграфического совещания. Хабаровск: Дальгеология, 1990. С. 97–98.

Кузнецов В.Г. Литология. Осадочные горные породы и их изучение. М.: Недра-Бизнесцентр, 2007. 511 с.

Куриленко А.В. О возрасте яковлевской свиты Восточного Забайкалья // Геология и полезные ископаемые Читинской области. Чита, 2000. С. 112–125.

Куриленко А.В. Возраст и криноидеи ильди́канской свиты (нижний–средний девон) Восточного Забайкалья // Бюлл. Моск. общ-ва испытателей природы. Отд. геол. 2001. Т. 76. Вып. 6. С. 43–47.

Куриленко А.В., Бретштейн Ю.С., Бутин К.С. Новые биостратиграфические и палеомагнитные данные по девону западной части Монголо-Охотского складчатого пояса // Тихоокеанская геология. 1999. Т. 18. № 6. С. 93–103.

Куриленко А.В., Котляр Г.В., Кульков Н.П., Раитина Н.И., Ядрищенская Н.Г., Старухина Л.П., Маркович Е.М., Окунева Т.М., Дольник Т.А., Попеко Л.И., Беляева Г.В., Бяков А.С., Башурова Н.Ф., Тимохин А.В., Коровников И.В., Могучева Н.К., Изох Н.Г., Анисимова С.А., Клец Т.В., Иванова Р.М., Стукалина Г.А. Атлас фауны и флоры палеозоя–мезозоя Забайкалья. Новосибирск: Наука, 2002. 714 с.

Озерский А.Ф., Винниченко Е.Л. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Издание второе. Приаргунская серия. Лист М-50-XI (Калга). СПб.: Санкт-Петербургская картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 1998.

Озерский А.Ф., Винниченко Е.Л., Кривицкий А.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Издание второе. Приаргунская серия. Лист М-50-V (Газимурский Завод). СПб.: Санкт-Петербургская картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2001.

Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И., Бодарч Г., Беличенко В.Г., Булгатов А.Н., Дриль С.И., Кириллова Г.Л., Кузьмин М.И., Ноклеберг У.Дж., Прокопьев А.В., Тимофеев В.Ф., Томуртогоо О., Янь Х. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеанская геология. 2003. Т. 22. № 6. С. 7–41.

Петтиджон Ф.Дж., Поттер П., Сивер Р.М. Пески и песчаники. М.: Мир, 1976. 535 с.

Попеко Л.И. Карбон Монголо-Охотского орогенного пояса. Владивосток: Дальнаука, 2000. 124 с.

Рутштейн И.Г., Богач Г.И., Беляков Е.А., Винниченко Е.Л., Пинаева Т.А., Шивохин Е.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Издание второе. Приаргунская серия. Лист М-50-III (Балей). СПб.: Санкт-Петербургская картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015.

Смирнова Ю.Н., Куриленко А.В., Хубанов В.Б. Состав и возраст пород областей сноса для нижне-среднекембрийских (?) терригенных отложений ерниченской толщи Аргунского массива, восточная часть Центрально-Азиатского складчатого пояса // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2023. Т. 31. № 5. С. 1–18.

Смирнова Ю.Н., Куриленко А.В., Хубанов В.Б., Дриль С.И. Источники и палеогеодинамическая обстановка накопления терригенных отложений нижнекембрийской быстринской свиты Аргунского массива // Тихоокеанская геология. 2024. Т. 23. № 2. С. 40–58.

Сорокин А.А., Кудряшов Н.М., Сорокин А.П. Фрагменты палеозойских активных окраин южного обрамления Монголо-Охотского пояса (на примере северо-восточной части Аргунского террейна, Приамурье) // Докл. АН. 2002. Т. 387. № 3. С. 382–386.

Сорокин А.А., Кудряшов Н.М., Цзинь Ли, Журавлев Д.З., Ян Пин, Сун Гуйхуа, Гао Лиминг. Раннепалеозойские гранитоиды восточной окраины Аргунского террейна, Приамурье: первые геохронологические и геохимические данные // Петрология. 2004. Т. 12. № 4. С. 415–425.

Сорокин А.А., Смирнова Ю.Н., Котов А.Б., Ковач В.П., Сальникова Е.Б., Попеко Л.И. Источники и области сноса палеозойских терригенных отложений Ольдойского террейна Центрально-Азиатского складчатого пояса: результаты Sm–Nd изотопно-геохимических и U–Pb геохронологических (LA-ICP-MS) исследований // Геохимия. 2015. № 6. С. 539–550.

Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 384 с.

Ханчук А.И. Геодинамика, магматизм и металлогения востока России. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с.

Шивохин Е.А., Озерский А.Ф., Куриленко А.В., Раутина Н.И., Карасев В.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000. Третье поколение. Серия Алдано-Забайкальская. Лист М-50 (Борзя). СПб.: ВСЕГЕИ, 2010.

Bavinton O.A. The nature of sulfidic metasediments at Kambalda and their broad relationships with associated ultramafic rocks and nickel ores // *Econ. Geol.* 1981. V. 76. Iss. 6. P. 1606–1628.

Blatt H., Middleton G., Murray R. Origin of sedimentary rocks. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1972. 634 p.

Condie K.C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales // *Chem. Geol.* 1993. V. 104. Iss. 1–4. P. 1–37.

Corfu F., Hanchar J.M., Hoskin P.W., Kinny P. Atlas of zircon textures // *Rev. Mineral. Geochem.* 2003. V. 53. № 1. P. 469–500.

Cullers R.L. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA // *Chem. Geol.* 2002. V. 191. Iss. 4. P. 305–327.

Feng Z., Liu Y., Li L., She H., Jiang L., Du B., Liu Y., Li W., Wen Q., Liang C. Subduction, accretion, and collision during the Neoproterozoic-Cambrian orogeny in the Great Xing'an Range, NE China: insights from geochemistry and geochronology of the Ali River ophiolitic mélange and arc-type granodiorites // *Precambrian Res.* 2018. V. 311. P. 117–135.

Feng Z., Zhang Q., Liu Y., Li L., Jiang L., Zhou J., Li W., Ma Y. Reconstruction of Rodinia supercontinent: evidence from the Erguna Block (NE China) and adjacent units in the eastern Central Asian orogenic Belt // *Precambrian Res.* 2022. V. 368. 106467.

Floyd P.A., Leveridge B.E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones // *J. Geol. Soc. London.* 1987. V. 144. Iss. 4. P. 531–542.

Ge W.C., Chen J.S., Yang H., Zhao G.C., Zhang Y.L., Tian D.X. Tectonic implications of new zircon U–Pb ages for the Xinghuadukou Complex, Erguna Massif, northern Great Xing'an Range, NE China // *J. Asian Earth Sci.* 2015. V. 106. P. 169–185.

Gehrels G.E. AgePick, Available online:

<https://sites.google.com/a/laserchron.org/laserchron/home/>. 2007.

Gehrels G. Detrital zircon U–Pb geochronology: current methods and new opportunities // *Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances*. Chapter 2. Eds. Busby C., Azor A. Chichester, UK: Blackwell Publishing Ltd., 2012. P. 45–62.

Gou J., Sun D.Y., Ren Y.S., Liu Y.J., Zhang S.Y., Fu C.L., Wang T.H., Wu P.F., Liu X.M. Petrogenesis and geodynamic setting of Neoproterozoic and Late Paleozoic magmatism in the Manzhouli-Erguna area of Inner Mongolia, China: geochronological, geochemical and Hf isotopic evidence // *J. Asian Earth Sci.* 2013. V. 67–68. P. 114–137.

Gou J., Sun D., Deng C., Feng Z., Tang Z. Petrogenesis of the Neoproterozoic Xinlin ophiolite, northern Great Xing'an Range, northeastern China: implications for the evolution of the northeastern branch of the Paleo-Asian Ocean // *Precambrian Res.* 2019. V. 350. 105925.

Griffin W.L., Powell W.J., Pearson N.J., O'Reilly S.Y. Glitter: data reduction software for laser ablation ICP-MS // *Laser Ablation-ICP-MS in the Earth Sciences. Current practices and outstanding issues*. Ed. Sylvester P. Mineral. Assoc. Can. Short Course Ser. 2008. V. 40. P. 308–314.

Hartmann L.A., Santos J.O.S. Predominance of high Th/U, magmatic zircon in Brazilian Shield sandstones // *Geology*. 2004. V. 32. Iss. 1. P.73–76.

Hartmann L.A., Leite J.A.D., Silva L.C., Remus M.V.D., McNaughton N.J., Groves D.I., Fletcher I.R., Santos J.O.S., Vasconcellos M.A.Z. Advances in SHRIMP geochronology and their impact on understanding the tectonic and metallogenic evolution of southern Brazil // *Aust. J. Earth Sci.* 2000. V. 47. P. 829–844.

Hou W., Zhao G., Han Y., Eizenhoefer P.R., Zhang X., Liu Q. A ~2.5 Ga magmatic arc in NE China: New geochronological and geochemical evidence from the Xinghuadukou Complex // *Geol. J.* 2020. V. 55. Iss. 4. P. 2550–2571.

Jackson S.E., Pearson N.J., Griffin W.L., Belousova E.A. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology // *Chem. Geol.* 2004. V. 211. P. 47–69.

Kurilenko A.V., Kulkov N.P. A proposed crinoid zonation of the Devonian deposits of eastern Transbaikal // *Bull. Giosci. Prague Czech. Geol. Surv.* 2008. V. 83. № 4. P. 461–472.

Li Z.Z., Qin K.Z., Li G.M., Jin L.Y., Song G.X. Neoproterozoic and Early Paleozoic magmatic records from the Chalukou ore district, northern Great Xing'an Range, NE China: implications for tectonic evolution and Mesozoic Mo mineralization // *J. Asian Earth Sci.* 2018. V. 165. P. 96–113.

Liu Y., Li W., Feng Z., Wen Q., Neubauer F., Liang C. A review of the Paleozoic tectonics in the eastern part of Central Asian Orogenic Belt // *Gondwana Res.* 2017. V. 23. P. 123–148.

Liu H., Li Y., Wan Z., Lai Ch.-K. Early Neoproterozoic tectonic evolution of the Erguna Terrane (NE China) and its paleogeographic location in Rodinia supercontinent: insights from magmatic and sedimentary record // *Gondwana Res.* 2020. V. 88. P. 185–200.

Ludwig K.R. Isoplot 3.6. A geochronological toolkit for Microsoft Excel // Berkeley Geochronology Center Spec. Publ. 2008. № 4. P. 1–77.

McDonough W.F., Sun S.S. The composition of the Earth // *Chem. Geol.* 1995. V. 120. P. 223–253.

McLennan S.M., Hemming S., McDaniel D.K., Hanson G.N. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics // *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 1993. V. 284. P. 21–40.

Powerman V.I., Buyantuev M.D., Ivanov A.V. A review of detrital zircon data treatment, and launch of a new tool ‘Dezirteer’ along with the suggested universal workflow // *Chem. Geol.* 2021. V. 583. 120437.

Segrenev A.S., Prots M.E. Evaluation of the use of polyvinyl alcohol in preparation of pressed samples for X-ray fluorescence analysis // *Inorganic Materials.* 2024. V. 60. P. 405–412.

Shao J., Li Y.F., Zhou Y.H., Wang H.B., Zhang J. Neo-Archaean magmatic event in Erguna massif of Northeast China: evidence from the zircon LA-ICP-MS dating of the gneissic monzogranite from the drill // *J. Jinlin Uni. Earth Sci.* 2015. V. 45. Iss. 2. P. 364–373.

Sláma J., Košler J., Condon D.J., Crowley J.L., Gerdes A., Hancher J.M., Horstwood M.S.A., Morris G.A., Nasdala L., Norberg N., Schaltegger U., Schoene B., Tubrett M.N., Whitehouse M.J. Plesovice zircon – A new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis // *Chem. Geol.* 2008. V. 249. P. 1–35.

Sorokin A.A., Kudryashov N.M. Paleozoic magmatism in the North-Eastern margin of the Argun terrane: timing and tectonic implications (Upper Amur Region) // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2004. V. 68. Iss. 11. A685.

Sorokin A.A., Kotov A.B., Sal’nikova Y.B., Kudryashov N.M. Early Paleozoic granitoids of the Argun, Mamyn, Bureya terranes of the Central Asian fold belt // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2009. V. 73. Iss. 13. A1254.

Tang J., Xu W.L., Wang F., Wang W., Xu M.J., Zhang Y.H. Geochronology and geochemistry of Neoproterozoic magmatism in the Erguna Massif, NE China: petrogenesis and implications for the breakup of the Rodinia supercontinent // *Precambrian Res.* 2013. V. 224. P. 597–611.

Vavra G., Schmid R., Gebauer D. Internal morphology, habit and U–Th–Pb microanalysis of amphibolite-to-granulite facies zircons: geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps) // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1999. V. 134. P. 380–404.

Vermeesch P. IsoplotR: a free and open toolbox for geochronology // *Geosci. Frontiers*. 2018. V. 9. P. 1479–1493.

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

Wu F.Y., Sun D.Y., Ge W.C., Zhang Y.B., Grant M.L., Wilde S.A., Jahn B.M. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China // *J. Asian Earth Sci.* 2011. V. 41. Iss. 1. P. 1–30.

Wu G., Chen Y., Chen Y., Zeng Q. Zircon U–Pb ages of the metamorphic supracrustal rocks of the Xinghuadukou Group and granitic complexes in the Argun massif of the northern Great Hinggan Range, NE China, and their tectonic implications // *J. Asian Earth Sci.* 2012. V. 49. P. 214–233.

Yang H., Liu Y., Zheng J., Liang Z., Wang X., Tang X., Su Y. Petrogenesis and geological significance of Neoproterozoic amphibolite and granite in Bowuleshan area, Erguna massif, Northeast China // *Geol. Bull. China*. 2017. V. 36. Iss. 2–3. P. 342–356.

Рецензенты В.П. Ковач, А.Б. Котов

ПОДРИСУНОЧНЫЕ ПОДПИСИ

Рис. 1. Положение объекта исследований на тектонической схеме (а) и геологические схемы северо-западной части Аргунского континентального массива (б, в). Тектоническая основа составлена по (Парфенов и др., 2003), схемы составлены по (Озерский и др., 2001; Озерский, Винниченко, 1998), с изменениями авторов.

1 – супертеррейны (континентальные массивы): АР – Аргунский, БЦ – Буря-Цзямусинский, включая террейны Буреинский (Б), Малохинганский (М), Ханкайский (Х); 2 – палеозойские–раннемезозойские складчатые пояса (ЮМ – Южномонгольско-Хинганский, СЛ – Солонкерский, ВД – Вундурмиао); 3 – позднеюрско-раннемеловые орогенные пояса; 4 – район исследований; 5 – кайнозойские рыхлые отложения; 6 – меловые вулканогенно-осадочные комплексы; 7 – юрские осадочные и вулканогенно-осадочные породы; 8 – мезозойские граниты и лейкограниты; 9 – пермские гранитоиды; 10 – раннепермские габбро; 11–13 – терригенные и терригенно-карбонатные отложения ямкунской серии: 11 – нижнекаменноугольная газимурозаводская свита, 12 – средне-верхнедевонская яковлевская свита, 13 – ниже-среднедевонская ильди́канская свита; 14 – нижекембрийские терригенно-карбонатные отложения быстринской свиты аргунской серии; 15 – вендские терригенно-карбонатные отложения белёту́йской свиты быркинской серии; 16 – разломы достоверные (а)

и предполагаемые (б); 17 – места отбора образцов для U–Pb датирования детритового циркона и их номера.

Рис. 2. Сводный разрез девонских и каменноугольных терригенно-карбонатных отложений Аргунского континентального массива.

1 – известняки и известковистые доломиты, 2 – аргиллиты, 3 – алевролиты, 4 – песчаники, 5 – туффиты, 6 – места отбора образцов для U–Pb датирования детритового циркона и их номера.

Рис. 3. Классификационные диаграммы (а) $\text{Na}_2\text{O}-(\text{Fe}_2\text{O}_3^*+\text{MgO})-\text{K}_2\text{O}$, (б) $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)-\log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ для терригенных отложений ямкунской серии Аргунского континентального массива.

1 – алевролиты ильдижанской свиты, 2 – песчаники, 3 – песчанистые алевролиты газимурозаводской свиты.

Рис. 4. Графики распределения лантаноидов для терригенных отложений (а) ильдижанской, (б, в) газимурозаводской свит ямкунской серии Аргунского континентального массива. Состав хондрита по (McDonough, Sun, 1995).

Рис. 5. Спайдер-диаграммы для терригенных отложений (а) ильдижанской, (б, в) газимурозаводской свит ямкунской серии Аргунского континентального массива. Состав верхней континентальной коры по (Тейлор, Мак-Леннан, 1988).

Рис. 6. Диаграммы (а) $\text{Zr}/\text{Sc}-\text{Th}/\text{Sc}$ (McLennan et al., 1993), (б) $\text{Rb}-\text{K}$ (Floyd, Leveridge, 1987), (в) $\text{La}/\text{Sc}-\text{Th}/\text{Co}$ (Cullers, 2002), (г) $\text{Th}-\text{La}-\text{Sc}$ (Cullers, 2002), (д) $(\text{CaO}+\text{MgO})-\text{SiO}_2/10-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ (Тейлор, Мак-Леннан, 1988), (е) $\text{A}-\text{C}-\text{Alk}$ (Bavinton, 1981) для терригенных отложений ильдижанской и газимурозаводской свит ямкунской серии Аргунского континентального массива.

Условные обозначения см. на рис. 3. Сокращения на рис. 6е: $\text{Alk} = \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$, $\text{A} = \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{C} = \text{CaO}$. Состав магматических пород по (Bavinton, 1981).

Рис. 7. Вариации значений (а) Th/Sc , (б) La/Sc , (в) Cr/Zr и (г) Th/Cr в терригенных отложениях ильдижанской и газимурозаводской свит ямкунской серии Аргунского континентального массива в сравнении с геохимическими “эталоны” (палеозойскими

базальтами и андезитами, фанерозойскими гранитами) по данным (Condie, 1993). Условные обозначения см. на рис. 3.

Рис. 8. Кривые относительной вероятности возрастов детритового циркона из (а) алевролита ильдижанской свиты (обр. Ю-189), (б) песчанистого алевролита (обр. Ю-184) и (в) песчаника (обр. Ю-182) газимурозаводской свиты ямкунской серии Аргунского континентального массива.

Рис. 9. Микрофотографии кристаллов циркона, выполненные в режиме катодолюминесценции, из алевролита ильдижанской свиты (обр. Ю-189) ямкунской серии Аргунского континентального массива.

Рис. 10. Микрофотографии кристаллов циркона, выполненные в режиме катодолюминесценции, из песчанистого алевролита газимурозаводской свиты (обр. Ю-184) ямкунской серии Аргунского континентального массива.

Рис. 11. Микрофотографии кристаллов циркона, выполненные в режиме катодолюминесценции, из песчаника газимурозаводской свиты (обр. Ю-182) ямкунской серии Аргунского континентального массива.

Рис. 12. Кумулятивные кривые изотопных возрастов детритового циркона из терригенных отложений ямкунской серии – алевролита ильдижанской свиты (обр. Ю-189), песчанистого алевролита (обр. Ю-184) и песчаника (обр. Ю-182) газимурозаводской свиты.

Рис. 13. Гистограммы распределения оценок возраста детритового циркона из терригенных пород ямкунской серии (а, г, д) в сравнении гистограммами распределения оценок возраста детритового циркона из отложений Ольдойского террейна (б, в, е) (Сорокин и др., 2015) Аргунского континентального массива.

Sources of Paleozoic Terrigenous Rocks of the Yamkun Series in the Northwestern Part of the Argun Continental Massif (Central Asian Fold Belt): Geochemical Features and Results of U–Th–Pb (LA-ICP-MS) Dating of Detrital Zircon

Yu. N. Smirnova^{a, #}, A. V. Kurilenko^{b, c}, V. B. Khubanov^d

^a *Institute of Geology and Nature Management of the Far Eastern Branch of the Russian Academy
of Sciences, Blagoveshchensk, Russia*

^b *Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg, Russia*

^c *Dobretsov Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-
Ude, Russia*

^d *Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: smirnova@ascnet.ru*

The results of geochemical studies of terrigenous rocks of the Lower-Middle Devonian Ildikan and Lower Carboniferous Gazimursky Zavod formations of the Yamkun series of the Argun massif (Central Asian fold belt), as well as the results of U–Th–Pb dating of detrital zircon from them, are presented. The geochemical features of the studied rocks suggest that they are sediments of the first cycle. Variations of contents of major and trace elements in the terrigenous rocks of the Ildikan and Gazimursky Zavod formations made it possible to establish that the main sources were felsic and intermediate igneous rocks. The Early Paleozoic and Neoproterozoic detrital zircon grains dominate in the rocks of the studied formations. The Middle Paleozoic and Late Paleozoic zircon grains occur in the siltstone and sandstone of the Gazimursky Zavod formation. The morphological characteristics and geochemical composition of zircon crystals of the terrigenous rocks of the Ildikan and Gazimursky Zavod formations allow us to suggest that igneous and metamorphic rocks were present in the source area. The Paleozoic and Neoproterozoic granitoids and granite gneisses of the Argun continental massif should be considered as the main sources of clastic material. The absence of zircon grains of Middle Paleozoic age in the terrigenous rocks of the Ildikan formation is related to the setting of tectonic and volcanic quiescence that existed before the Eiffel within the Argun massif. At the same time, the presence of a significant group of zircon grains of the Early Carboniferous age in the deposits of the Gazimursky Zavod formation indicates their accumulation against the active magmatic activity.

Keywords: Ildikan formation, Gazimursky Zavod formation, geochemistry, U–Pb dating, Argun massif