

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Геотектоника, геодинамика и минералогия

УДК 551.735.1 (571.5)

DOI 10.31242/2618-9712-2018-26-4-5-15

Позднепалеозойско-мезозойская палеогеография Южного Верхоянья по данным U-Pb датирования обломочных цирконов

А.В. Прокопьев*, Х. Торо**, Э.Л. Миллер***

**Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия*

***Университет Западной Виргинии, Моргантаун, США*

****Стэнфордский университет, Стэнфорд, США*
prokopiev@diamond.ysn.ru

Аннотация. С целью установления питающих провинций позднепалеозойско-мезозойских осадочных бассейнов Южного Верхоянья было проведено изотопное U-Pb (LA-MC-ICPMS) датирование 522 зерен обломочных цирконов из пяти проб. Показано, что на протяжении позднего палеозоя и раннего мезозоя существовала крупная речная система Палео-Алдан, которая сформировалась после среднепалеозойского рифтогенеза (после раннего карбона) и трассировалась в пределах Южного Верхоянья с юга на север в сторону Верхоянской пассивной континентальной окраины. Основными питающими провинциями для бассейнов осадконакопления являлись фундамент Сибирского кратона (Алданский щит и Охотский террейн), вулканы Восточно-Азиатской активной континентальной окраины, докембрийские терригенные породы Южного Верхоянья, Ангара-Витимский батолит и каледониды Прибайкалья. Созданы палеогеографические реконструкции на территорию северо-востока Азии на позднекаменноугольное, пермское, раннетриасовое и раннеюрское время.

Ключевые слова: Южно-Верхоянский орогенный пояс, северо-восток Азии, возраст обломочных цирконов, палеогеография.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 16-05-00705 и частично по плану НИР ИГАБМ СО РАН (проект 0381-2016-0001).

DOI 10.31242/2618-9712-2018-26-4-5-15

Late Paleozoic-Mesozoic paleogeography of South-Verkhoyansk region from U-Pb dating of detrital zircons

A.V. Prokopiev*, J. Toro**, E.L. Miller***

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

***West Virginia University, Morgantown, USA*

****Stanford University, Stanford, USA*
prokopiev@diamond.ysn.ru

Abstract. To determine distributive provinces for the Late Paleozoic-Mesozoic sedimentary basins of South Verkhoyanye, U-Pb (LA-MC-ICPMS) isotope dating of 522 detrital zircon grains from five samples was made. It was established that during the late Paleozoic and Early Mesozoic there existed a major Paleo-

Aldan river system that formed after Middle Paleozoic rifting (following the Early Carboniferous) and was traceable within South Verkhoyanye from south to north toward the Verkhoyansk passive continental margin. The main distributive provinces for sedimentary basins were the Siberian craton basement (Aldan shield and Okhotsk terrane), volcanites of the East Asian active continental margin, Precambrian terrigenous rocks of South Verkhoyanye, Angara-Vitim batholith, and Cisbaikalian Caledonides. Paleogeographic reconstructions of northeast Asia for Late Carboniferous, Permian, Early Triassic, and Early Jurassic times were compiled.

Key words: South Verkhoyansk orogenic belt, north-east Asia, age of detrital zircons, paleogeography.

Acknowledgments. The study was made with the support of RFBR (grant no. 16-05-00705) and, partly, within the framework of the Research Program of DPMGI SB RAS (project 0381-2016-0001).

Введение

Южно-Верхоянский орогенный пояс протягивается в субмеридиональном направлении на 800 км при ширине от 60 до 150 км, отделяясь от Сибирской платформы Кыллахским и Краинным надвигами. В его пределах выделяются три тектонических зоны [1, 2] (рис. 1). Кыллахская зона протягивается вдоль границы с платформой. Она сложена рифейскими, вендскими, кембрийскими и ордовикскими терригенно-карбонатными отложениями. В центральной и южной частях зоны эти толщи несогласно перекрываются карбонатными отложениями нижнего карбона и терригенными породами нижней перми и нижней юры. Сетте-Дабанская зона, занимающая осевое положение, сложена отложениями венда, нижнего и среднего палеозоя. Аллах-Юньская зона, расположенная восточнее, охватывает Южно-Верхоянский синклиниорий, сложенный обломочными породами верхнего палеозоя и триаса, слагающими верхоянский терригенный комплекс мощностью более 10 км [3]. Накопление пород верхоянского комплекса началось после завершения среднепалеозойского рифтогенеза, широко проявленного на востоке Сибирского кратона. Отложения среднего-верхнего карбона, перми и триаса представлены прибрежно-морскими, дельтовыми и шельфовыми образованиями, слагающими южный фланг Верхоянской пассивной континентальной окраины [4, 5]. Осадконакопление контролировалось подводными конусами выноса, проградировавшими в северном направлении, а обломочный материал в бассейны седиментации поставлялся крупной речной системой [4, 6]. Непосредственно к западу от орогенного пояса в пределах Сибирской платформы широко распространены континентальные терригенные юрские отложения, которые во фронте Кыллахской зоны перекрывают среднекембрийские и нижнепермские толщи и слагают мульды синклиналей [7, 8].

Ранее были проведены работы по изучению возраста обломочных цирконов из пород мезо- и неопротерозоя и нижнего кембрия, установлены вероятные источники сноса кластики в бассей-

ны осадконакопления этого времени и предложены палеогеодинамические реконструкции [9, 10].

Задачей проведенных нами исследований являлось на основании изотопного U-Pb (LA-MC-ICPMS) датирования обломочных цирконов из пород позднего палеозоя-мезозоя Южного Верхоянья установить основные питающие провинции седиментационных бассейнов и определить основные черты палеогеографии этого временного интервала.

Методы

Нами проведено U-Pb датирование 522 зерен обломочных цирконов, выделенных из проб, отобранных из отложений нижнего карбона (99JT51) (60°24'12" с.ш., 137°25'50" в.д.), суркчанской свиты верхнего карбона (99JT64) (59°45'01" с.ш., 137°41'57" в.д.), нижней перми (99JT58) (59°47'51" с.ш., 138°24'10" в.д.), некучанской свиты нижнего триаса (06АП37) (63°09'21" с.ш., 139°14'17" в.д.) и килляхской свиты нижней юры (99JT01) (60°39'55" с.ш., 135°45'10" в.д.) (рис. 1, 2). Предварительная пробоподготовка и выделение цирконов проведены в ИГАБМ СО РАН и Университете Виргинии, США; U-Pb датирование цирконов (LA-ICP-MS): образцов 99JT01, 99JT51, 99JT58, 99JT64 – в Отделении геологических наук Стокгольмского университета; образца 06АП37 – в Аризонском университете (University Arizona Laser-Chron Center) по методике (<http://www.geo.arizona.edu/alc/>). Итоговые U-Pb датировки, полученные для каждого определения, фиксировались с аналитической ошибкой измерения $\pm 2\sigma$. Для обломочных цирконов с возрастом более 1000 млн. лет за время их кристаллизации в исходной породе принимался возраст, рассчитанный по отношению $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, а для более молодых – возраст, рассчитанный по отношению $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$. Построение графиков распределения плотности вероятности возрастов производилось в программе Isoplot 3.0 [11]. Диаграммы распределения возрастов обломочных цирконов для изученных образцов приведены на рис. 3.

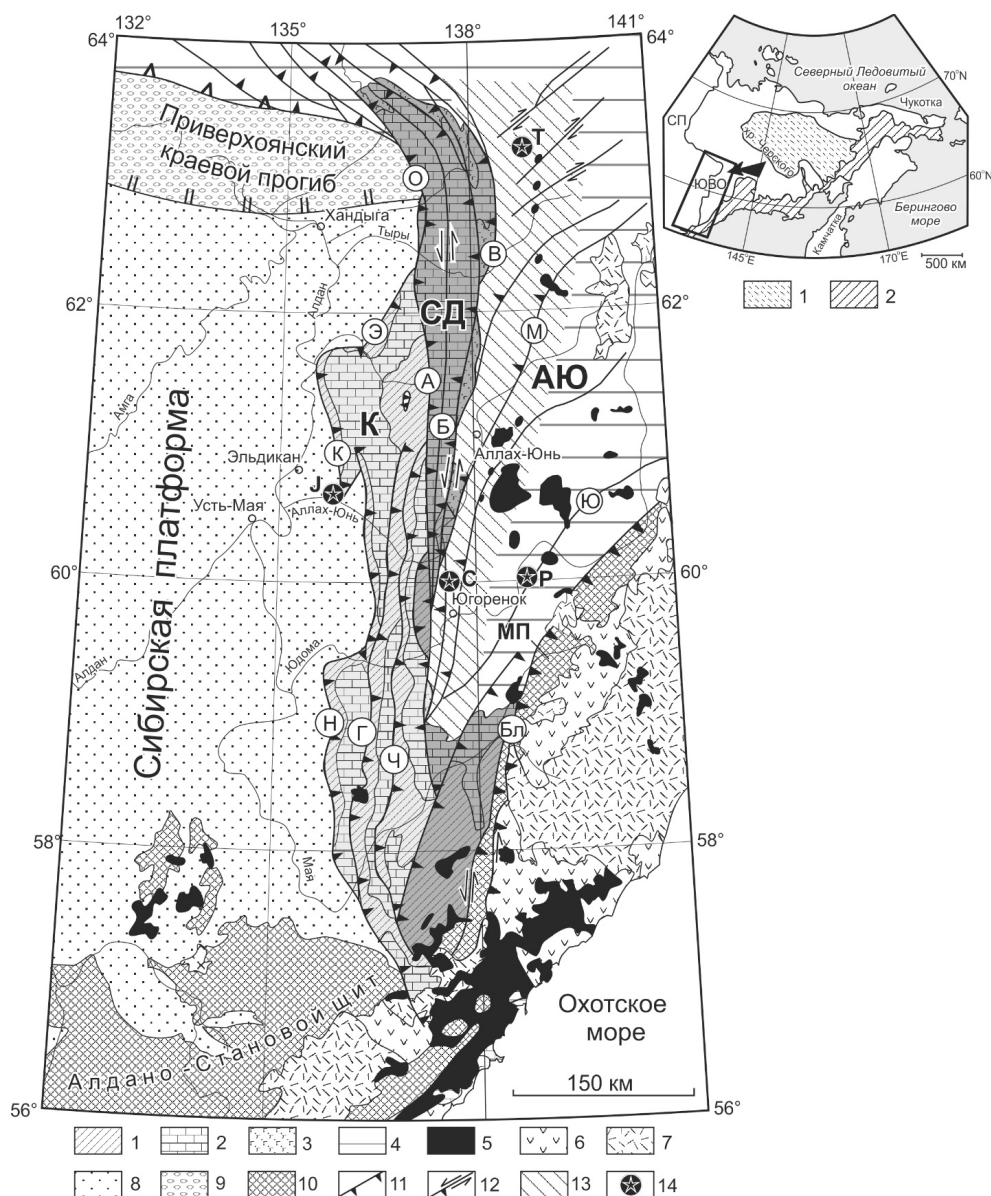


Рис. 1. Тектоническая карта Южно-Верхоянского орогенного пояса и местоположение изученных образцов (по [2], с изменениями и дополнениями):

1–4 – отложения: 1 – рифейские, 2 – венд-нижнепалеозойские, 3 – среднедевонские-нижнекаменноугольные, 4 – верхнепалеозойские-мезозойские; 5–7 – вулканоплутонические пояса: 5 – мезозойские гранитоиды, 6 – Удской пояс, 7 – Охотско-Чукотский пояс; 8 – осадочный чехол Сибирской платформы; 9 – Приверхоянский краевой прогиб; 10 – раннедокембрийские образования Алдано-Станового щита и Верхне-Майского поднятия (МВ) Охотского террейна; 11 – надвиги: К – Кыллахский, О – Краинный, М – Минорский, Ю – Юдомский, Н – Нельканский, Г – Гувиндинский, Ч – Чагдинский, А – Акринский, В – Восточно-Сетте-Дабанский; 12 – сдвиги и взбрососдвиги: Бл – Билякчанский, Б – Бурхалинский; 13 – Южно-Верхоянский метаморфический пояс; 14 – местоположение изученных образцов (С – каменноугольного, Р – пермского, Т – триасового, J – юрского возрастов). Тектонические зоны: К – Кыллахская, СД – Сетте-Дабанская, АЮ – Аллах-Юньская.

На врезке показано местоположение региона: 1 – Колымо-Омолонский микроконтинент; 2 – Восточно-Азиатская активная континентальная окраина. ЮВО – Южно-Верхоянский орогенный пояс, СП – Сибирская платформа

Fig. 1. Tectonic map of the South Verkhoyansk orogenic belt and location of the studied samples (modified and supplemented from [2]): 1–4 – deposits: 1 – Riphean, 2 – Vendian-Lower Paleozoic, 3 – Middle Devonian-Lower Carboniferous, 4 – Upper Paleozoic-Mesozoic; 5–7 – volcanic-plutonic belts: 5 – Mesozoic granitoids, 6 – Uda belt, 7 – Okhotsk-Chukotka belt; 8 – sedimentary cover of the Siberian platform; 9 – Priverkhoyansk foredeep; 10 – Early Precambrian rocks of the Aldan-Stanovoy shield and Upper Maya uplift (MB) of the Okhotsk terrane; 11 – thrusts: K – Kyllakh, O – Okrainnyy, M – Minor, YU – Yudoma, N – Nel'kan, G – Guvinda, Ch – Chagda, A – Akra, B – East Sette-Daban; 12 – strike-slip faults and reverse-strike-faults: Bl – Bilyakchan, B – Burkhalin; 13 – South Verkhoyansk metamorphic belt; 14 – location of studied samples (C – Carboniferous, P – Permian, T – Triassic, J – Jurassic). Tectonic zones: K – Kyllakh, SD – Sette-Daban, AYU – Allakh-Yun'.

Inset map shows location of the region: 1 – Kolyma-Omolon microcontinent; 2 – East-Asian active continental margin. YVO – South Verkhoyansk orogenic belt, SPI – Siberian platform

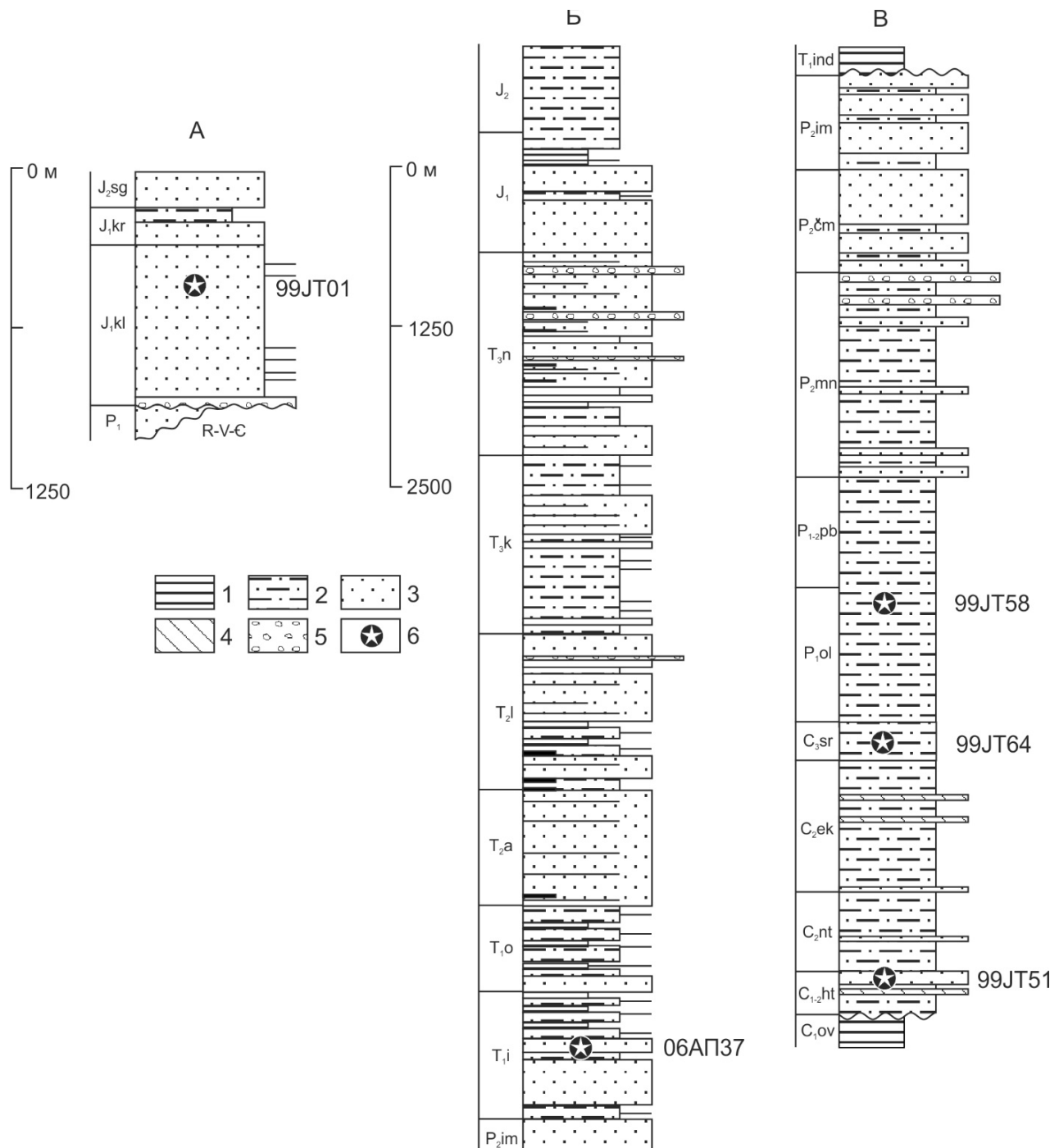


Рис. 2. Стратиграфические колонки Южно-Верхоянского орогенного пояса, на которых показано местоположение изученных образцов (по [3], с изменениями и дополнениями): А – центральная часть фронта Южно-Верхоянского орогенного пояса; Б – северо-восток Южно-Верхоянского синклиниория; В – центральная часть Южно-Верхоянского синклиниория: 1 – аргиллиты; 2 – алевролиты; 3 – песчаники; 4 – туфопесчаники; 5 – конгломераты; 6 – местоположение изученных образцов

Fig. 2. Stratigraphic columns of the South Verkhoyansk orogenic belt with location of studied samples (modified and supplemented from [3]): А – central part of the South Verkhoyansk orogenic belt front; Б – northeastern part of the South Verkhoyansk synclinorium; В – central part of the South Verkhoyansk synclinorium:

1 – mudstone; 2 – siltstone; 3 – sandstone; 4 – tuffaceous sandstone; 5 – conglomerates; 6 – location of studied samples

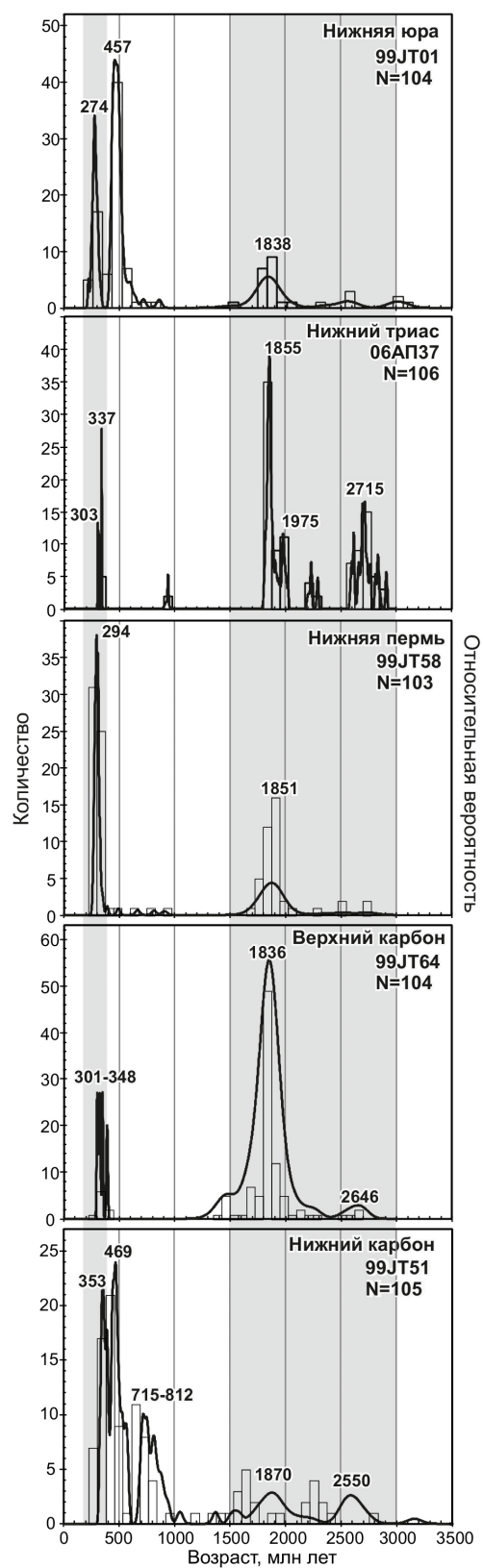


Рис. 3. Корреляция распределения возрастов обломочных цирконов из позднепалеозойских-раннемезозойских отложений Южного Верхоянья

Fig. 3. Correlation between age distribution of detrital zircons from the Late Paleozoic-Early Mesozoic rocks of South Verkhoyansk

Результаты и обсуждение

В отложениях нижнего карбона (обр. 99JT51) 47% обломочных цирконов имеют палеозойский возраст. Отмечаются два основных возрастных пика в ~353 и ~469 млн. лет (рис. 3). Источники этих цирконов неясны. Возраст раннекаменноугольных цирконов близок к времени осадконакопления изученной толщи и они могли поступать с Северо-Охотской активной континентальной окраины [12, 13]. Источниками цирконов с возрастом ~469 млн. лет могли быть распространенные на западной окраине Охотского террейна ордовикские граниты [14]. Возраст популяции неопротерозойских цирконов (30%) образует пик ~715–812 млн. лет, палеопротерозойские цирконы представлены лишь единичными зернами, а мезопротерозойские и неоархейские зерна (1870 и 2550 млн. лет соответственно) группируются в два небольших возрастных пика (рис. 3). Источником этих цирконов могли являться размывавшиеся в раннем карбоне отложения распространенной в Южном Верхоянье неопротерозойской юдомской свиты, а также мезопротерозойские толщи, содержащие цирконы такого возраста [10]. В целом небольшое количество неоархейско-мезопротерозойских зерен, значительное количество цирконов неопротерозойского, ордовикского и раннекаменноугольного возраста может свидетельствовать о близости питающих провинций в это время и значительном размыве подстилающих докембрийских и, вероятно, раннепалеозойских пород.

В дельтовых отложениях верхнего карбона (обр. 99JT64) 90% зерен цирконов имеют докембрийский возраст (рис. 3). Из них основная масса образует возрастной пик ~1836 млн. лет и второстепенный ~2646 млн. лет. Источниками цирконов этих возрастных популяций могли быть кристаллический фундамент Сибирской платформы и/или фундамент Охотского террейна [14–16]. На западе Охотского террейна присутствуют гранитоиды позднего архейского возраста [13], а в центральной части Охотского террейна как архейские, так и палеопротерозойские породы кристаллического фундамента [14]. Значения возраста молодых зерен (~10 %) образуют компактные пики в диапазоне 301–348 млн. лет. Можно предположить, что их источником был расположенный на значительном расстоянии к западу Ангаро-Витимский батолит Забайкалья. С другой стороны, в толщах верхнего карбона присутствуют как туфогенные песчаники, так и конгломераты, содержащие многочисленную гальку кислых и средних эффузивных пород и гранитоидов [7], что предполагает относительно ближний снос кластики. Таким об-

разом, другим вероятным источником обломочного материала могли являться вулканогенно-осадочные породы предполагающейся к югу и юго-востоку Кони-Мургальской (Удско-Мургальской) вулканической дуги [17]. Два зерна имеют возраст ~390 млн. лет, как и расположенный в пределах Верхне-Майского поднятия Охотского террейна Мастахский гранитоидный плутон и кислые вулканы позднедевонской матийской свиты [13].

Дельтовые отложения нижней перми (обр. 99JT58) слагают обширные конуса выноса, проградирующие в северном направлении [3–5]. 44 % от общего числа изученных цирконов имеют докембрийский возраст и в этой популяции преобладают палеопротерозойские зерна (возрастной пик ~1851 млн. лет). Позднееоархейские датировки редки. Вероятным источником этих возрастных популяций цирконов могли также быть кристаллический фундамент Сибирской платформы и/или фундамент Охотского террейна [13–16]. Однако отсутствие палео- и мезоархейских датировок, соответствующих широко распространенным в центральной части Охотского террейна метаморфическим образованиям [14], указывает, что основное поступление кластики происходило с Алданского щита. Зерен цирконов фанерозойского возраста около 55 % и они образуют значимый возрастной пик ~294 млн. лет, что свидетельствует о размыве источников обломочного материала, близких времени осадконакопления. Этот возраст близок к кульминации магматической активности Ангаро-Витимского батолита [18], однако присутствие вулканогенного материала в разрезе пермских толщ Южного Верхоянья не исключает поступления кластики с Кони-Мургальской дуги. В пермских терригенных породах расположенного восточнее Охотского террейна Аян-Юряхского антиклинория также отмечается существенный привнос вулканогенного материала с этой магматической дуги [19].

В дельтовых отложениях нижнего триаса (обр. 06АП37) более 65 % зерен цирконов имеют палеопротерозойский и неоархейский возраст. Наиболее значимые пики ~1855 и ~2715 млн. лет указывают на то, что их источником мог быть кристаллический фундамент Сибирской платформы и/или фундамент Охотского террейна [16]. Источником популяции цирконов с возрастным пиком ~1975 млн. лет могли быть имеющие близкие возраста (~1968 млн. лет) палеопротерозойские гранитоиды Юровского поднятия Охотского террейна [20]. Фанерозойские цирконы в триасовых отложениях составляют менее 20 % и образуют значимый возрастной пик ~303–337 млн. лет (рис. 3). Ближайшим источни-

ком цирконов этого возраста мог являться Ангаро-Витимский батолит и/или размывавшиеся породы верхнего палеозоя верхоянского комплекса.

В континентальных отложениях нижней юры (обр. 99JT01) палеопротерозойские и неархейские зерна составляют менее 10 %. Основной пик имеет возраст ~1838 млн. лет и также указывает на размыв пород кристаллического фундамента Сибирской платформы, либо древнейших образований Охотского террейна. Основная часть цирконов имеет фанерозойский возраст и образует две популяции с пиками ~474 млн. лет (ранний ордовик) и ~274 млн. лет (ранняя пермь) (рис. 3). Источниками этих цирконов могли быть как распространенные на западной окраине Охотского террейна ордовикские граниты [14], так и известные в Прибайкалье каледониды [6]. Поставщиком раннепермских обломочных цирконов могли быть как гранитоиды завершающих фаз формирования Ангаро-

Витимского батолита [18], так и вулканиты расположенной восточнее Удско-Мургальской дуги. В настоящее время невозможно однозначно ответить, какие питающие провинции для юрского бассейна осадконакопления Южного Верхоянья были основными. Мы предполагаем, что источники могли быть смешанными и кластика поступала как с запада со стороны Сибирской платформы и ее юго-западной периферии, так и с востока со стороны Охотского террейна.

Заключение

Таким образом, установлены возможные питающие провинции для позднепалеозойских и раннемезозойских осадочных бассейнов Южного Верхоянья. На рис. 4 показаны палеогеографические реконструкции на эти временные интервалы.

1. На протяжении позднего палеозоя и раннего мезозоя существовала крупная речная систе-

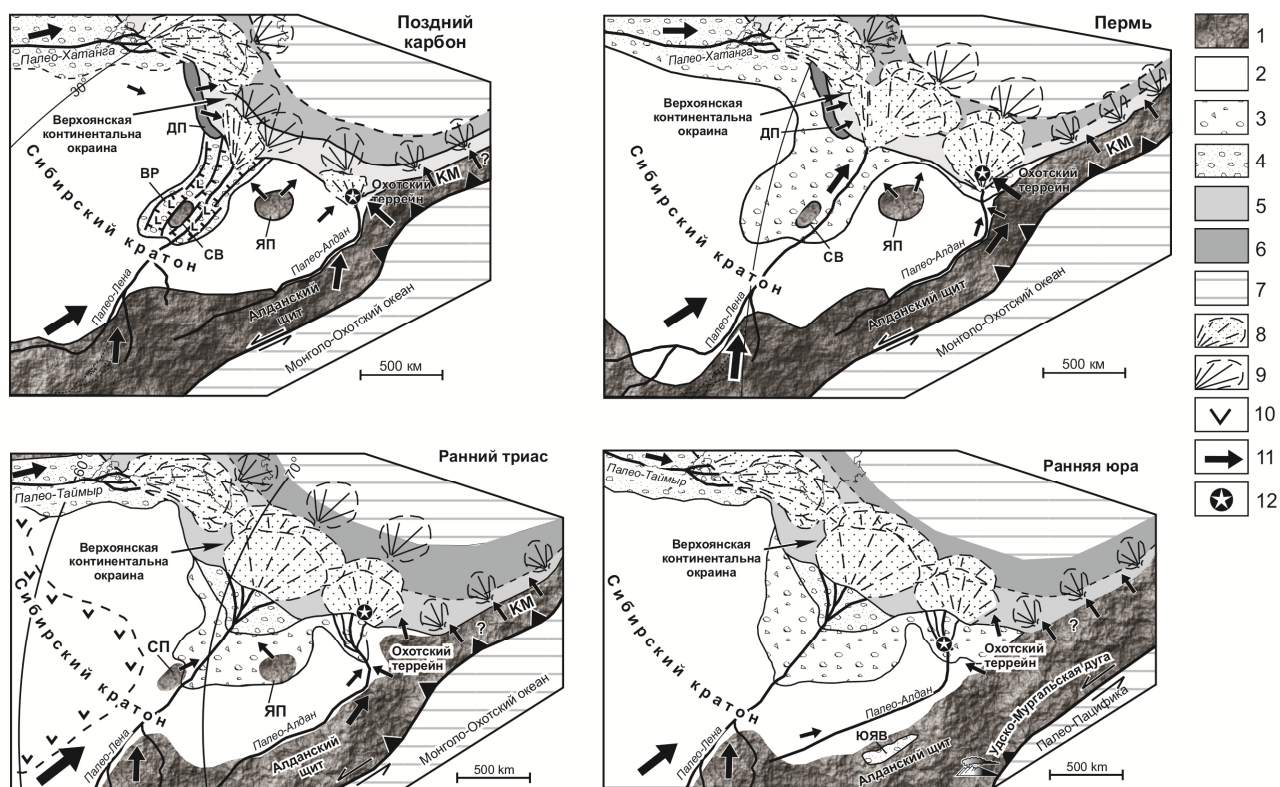


Рис. 4. Палеогеографические схемы на поздний карбон, пермь, ранний триас и раннюю юру (по [6], с изменениями и дополнениями):

1 – поднятия; 2 – низменности; 3 – прибрежные аллювиальные равнины; 4 – лагуны; 5 – внутренний шельф; 6 – внешний шельф; 7 – океаническая кора; 8 – дельты; 9 – подводные конуса выноса; 10 – Сибирские траппы; 11 – направления палеопотоков; 12 – местоположение изученных образцов.

СП – Сунтарское и ЯП – Якутское поднятия фундамента, КМ – Кони-Мургальская дуга, ВР – Вилуйский рифт, ДП – Джарджанское поднятие, ЮЯВ – Южно-Якутские впадины

Fig. 4. Paleogeographic maps for the Late Carboniferous, Permian, Early Triassic, and Early Jurassic (modified and supplemented from [6]):

1 – uplift; 2 – lowland; 3 – coastal alluvial plain; 4 – lagoon; 5 – inner shelf; 6 – outer shelf; 7 – oceanic crust; 8 – delta; 9 – submarine fan; 10 – Siberian Trap basalt; 11 – provenance direction; 12 – detrital zircon samples. СП – Suntar and ЯП – Yakut basement uplifts, КМ – Koni-Murgal arc, ВР – Vilyuy rift, ДП – Dzhardzhan uplift, ЮЯВ – South Yakut basins

ма – Палео-Алдан, которая трассировалась в пределах Южного Верхоянья с юга на север.

2. В исследованных отложениях верхнего карбона–юры крайне незначительно присутствуют цирконы с возрастными интервалами 900–1550 млн. лет, свидетельствуя, что широко распространенные толщи мезо- и неопротерозоя Южного Верхоянья в это время не подвергались существенному размыву, так как цирконы этого возраста в них преобладают [9, 10]. Это также является доказательством того, что основным источником в это время являлся Сибирский кратон, в фундаменте и на периферии которого магматические образования кислого и среднего состава (основной поставщик цирконов) такого возраста практически отсутствуют [6, 21]. Однако в раннекаменноугольное время непосредственно после среднепалеозойского этапа рифтогенеза, вероятно, еще не существовало крупных речных систем и более интенсивному размыву могли подвергаться отложения докембрия.

3. Питающие провинции для позднекаменноугольно-юрского бассейна осадконакопления были смешанными: с юга и запада со стороны Алданского щита и, возможно, Ангара-Витимского батолита и с востока и юго-востока со стороны Кони-Мургальской магматической дуги. Полученные данные косвенно подтверждают существование этой дуги в пределах Восточно-Азиатской активной континентальной окраины, так как в непосредственной близости к югу и востоку от Южного Верхоянья магматические образования этого возраста неизвестны, либо перекрыты вулканогенно-осадочными породами позднеюрско-раннемеловой Удской дуги и вулканитами мелового Охотско-Чукотского пояса.

4. В позднем карбоне–триасе основными источниками сноса докембрийской кластики были как образования Сибирского кратона (Алданский щит), так и его юго-восточной части – Охотского террейна, которые в это время подвергались интенсивному размыву. Наибольшее поступление обломочного материала происходило с Алданского щита, так как геологические образования с возрастом ~1850 млн. лет известны здесь в зонах тектонического меланжа [16].

5. Подстилающие раннепалеозойские и позднедокембрийские образования Южного Верхоянья практически не размывались и, по всей вероятности, находились в это время ниже базиса эрозии. Однако нельзя исключить, что в триасе и юре происходил перемыв позднепалеозойских осадков, содержащих цирконы такого же возрастного диапазона, что и в изученных нижележащих отложениях. Непонятным является факт отсутствия в отложениях нижнего триаса зерен

цирконов пермского возраста, которые широко представлены в породах нижней перми и юры (рис. 3). Одной из вероятных причин может быть то, что при пробоподготовке обр. 06АП37 были отобраны вручную, а не случайным образом, только идиоморфные кристаллы циркона.

6. Поставщиком каменноугольных и пермских обломочных цирконов могли быть как гранитоиды завершающих фаз формирования Ангара-Витимского батолита, так и вулканиты расположенной восточнее Кони-Мургальской магматической дуги.

7. Увеличение доли близких к возрасту осадконакопления обломочных цирконов в пермских отложениях может свидетельствовать об расширении речной системы Палео-Алдана на рубеже карбона и перми, если предположить, что в это время происходил размыв не только вулканитов Кони-Мургальской дуги, но и гранитоидов Ангара-Витимского батолита.

8. Источниками цирконов с возрастом ~460 млн. лет могли быть как распространенные на западной окраине Охотского террейна ордовикские граниты (Верхне-Майское поднятие) [14, 15], так и известные в Прибайкалье каледониды [6].

Литература

1. Прокопьев А.В. Кинематика мезозойской складчатости западной части Южного Верхоянья. Якутск: ЯНЦ СО АН СССР, 1989. 128 с.
2. Прокопьев А.В., Дейкуненко А.В. Деформационные структуры складчато-надвиговых поясов // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 156–198.
3. Прокопьев А.В., Парфенов Л.М., Томишин М.Д., Колодезников И.И. Чехол Сибирской платформы и смежных складчато-надвиговых поясов // Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. С. 113–155.
4. Khudoley A.K., Guriev G.A. The formation and development of a Late Paleozoic sedimentary basin on the passive margin of the Siberian paleocontinent // In: Pangea: Global Environments and Resources Canadian Society of Petroleum Geologists. 1994. Memoir 17. P. 131–143.
5. Худoley А.К., Гурьев Г.А. Южное Верхоянье – пример среднепалеозойско-мезозойской пассивной окраины // Докл. РАН. 1998. Т. 362, № 5. С. 666–669.
6. Prokopyev A.V., Toro J., Miller E.L., Gehrels G.E. The paleo-Lena River – 200 m.y. of transcontinental zircon transport in Siberia // Geology. 2008. V. 36, no. 9. P. 699–702. DOI: 10.1130/G24924A.1.

7. Коростелев В.И. Геология и тектоника Южного Верхоянья. Новосибирск: Наука, 1981. 217 с.

8. Ян-жун-шин В.А. Тектоника Сетте-Дабанского горст-антиклинария. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1983. 156 с.

9. Rainbird R.H., Stern R.A., Khudoley A.K., Kropachev A.P., Heaman L.M., Sukhorukov V.I. U-Pb geochronology of Riphean sandstone and gabbro from southeast Siberia and its bearing on the Laurentia – Siberia connection // *Earth and Planetary Science Letters*. 1998. V. 164. P. 409–420. DOI:10.1016/s0012-821x(98)00222-2.

10. Khudoley A., Chamberlain K., Ershova V., Sears J., Prokopyev A., MacLean J., Kazakova G., Malyshev S., Molchanov A., Kullerud K., Toro J., Miller E., Veselovskiy R., Li A., Chipley D. Proterozoic supercontinental restorations: Constraints from provenance studies of Mesoproterozoic to Cambrian clastic rocks, eastern Siberian Craton // *Precambrian Research*. 2015. V. 259. P. 78–94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2014.10.003>.

11. Ludwig K.R. Isoplot 3.00. Berkeley Geochronology Center Special Publication. 2003. No. 4. 70 p.

12. Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И., Бадарч Г., Беличенко В.Г., Булгаков А.Н., Дриль С.И., Кириллова Г.Л., Кузьмин М.И., Ноклеберг У., Прокопьев А.В., Тимофеев В.Ф., Томуртогов О., Янь Х. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // *Тихоокеанская геология*. 2003. № 6. С. 7–42.

13. Prokopyev A.V., Toro J., Hourigan J.K., Bakharev A.G., Miller E.L. Middle Paleozoic-Mesozoic boundary of the North Asian craton and the Okhotsk terrane: new geochemical and geochronological data and their geodynamic interpretation // *Stephan Mueller Spec. Publ. Ser.* 2009. V. 4. P. 71–84.

14. Кузьмин В.К., Чухонин А.П., Шулешко И.К. Этапы метаморфической эволюции пород кристаллического фундамента Кухтуйского поднятия (Охотский массив) // *Докл. РАН*. 1995. Т. 342, № 6. С. 789–791.

15. Кузьмин В.К., Беляцкий Б.В., Наумов М.В. Первые Sm-Nd данные о позднеордовикском возрасте гранитоидов Верхнемайского поднятия (Охотский массив) // *Докл. РАН*. 2003. Т. 390, № 2. С. 228–232.

16. Smelov A.P., Timofeev V.F. The age of the North Asian Cratonic basement: an overview // *Gondwana Research*. 2007. V. 12. P. 279–288. DOI:10.1016/j.gr.2006.10.017.

17. Парфенов Л.М. Континентальные окраины и островные дуги мезозойд Северо-Востока Азии. Новосибирск: Наука, 1984. 192 с.

18. Цыганков А.А., Удорткина О.В., Бурмакина Г.Н., Гроув М. Новые данные U-Pb датирова-

ния цирконов и проблема длительного формирования Ангаро-Витимского батолита // *Докл. РАН*. 2012. Т. 447, № 2. С. 204–209.

19. Бяков А.С., Ведерников И.Л. Сравнение литохимических характеристик глинистых пород перми и нижнего триаса южной части Яно-Колымской складчатой системы в связи с присутствием в них пирокластического материала // *Вестник СВНЦ ДВО РАН*. 2013. № 3. С. 3–10.

20. Кузьмин В.К., Глебовицкий В.А., Проскурнин В.Ф., Богомолов Е.С., Зеленугин В.Н., Родионов Н.В., Юрченко Ю.Ю. Палеопротерозойские гранитоиды кристаллического фундамента Юровского поднятия (Охотский массив): первые геохронологические U-Pb-SHRIMP-II- и изотопно-геохимические Nd-Sr-данные // *Докл. РАН*. 2018. Т. 478, № 2. С. 196–200. DOI:10.7868/S0869565218020160.

21. Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Wingate M.T.D., Mazukabzov A.M., Pisarevsky S.A., Sklyarov E.V., Stanevich A.M. A one-billion-year gap in the Precambrian history of the southern Siberian craton and the problem of the Transproterozoic supercontinent // *American Journal of Science*. 2010. V. 310, no. 9. P. 812–825. DOI:10.2475/09.2010.03.

References

1. Prokopyev A.V. Kinematika mezozojской складчатости западной части Yuzhnogo Verkhoyan'ya. Yakutsk: YaNTs SO AN SSSR, 1989. 128 s.

2. Prokopyev A.V., Dejkunenkov A.V. Deformatcionnye struktury skladchato-nadvigovykh pojasov // *Tektonika, geodinamika i metallogeniya territorii Respubliki Sakha (Yakutiya)*. M.: MAIK «Nauka / Interperiodika», 2001. S. 156–198.

3. Prokopyev A.V., Parfenov L.M., Tomshin M.D., Kolodeznikov I.I. Chekhol Sibirskoj platformy i smezhnykh skladchato-nadvigovykh pojasov // *Tektonika, geodinamika i metallogeniya territorii Respubliki Sakha (Yakutiya)*. M.: MAIK «Nauka / Interperiodika», 2001. S. 113–155.

4. Khudoley A.K., Guriev G.A. The formation and development of a Late Paleozoic sedimentary basin on the passive margin of the Siberian paleocontinent // *In: Pangea: Global Environments and Resources Canadian Society of Petroleum Geologists*, 1994. Memoir 17. P. 131–143.

5. Khudoley A.K., Guriev G.A. Yuzhnoe Verkhoyan'e – primer srednepaleozojско-mezozojской passivnoy okrainy // *Doklady RAN*. 1998. Т. 362, № 5. С. 666–669.

6. Prokopyev A.V., Toro J., Miller E.L., Gehrels G.E. The paleo-Lena River – 200 m.y. of transcontinental zircon transport in Siberia // *Geology*. 2008. V. 36, no. 9. P. 699–702. DOI:10.1130/G24924A.1.

7. Korostelev V.I. Geologiya i tektonika Yuzhnogo Verkhoyan'ya. Novosibirsk: Nauka, 1981. 217 s.

8. Yan-zhin-shin V.A. Tektonika Sette-Dabansko-go gorst-antiklinoriya. Yakutsk: YaF SO AN SSSR, 1983. 156 s.
9. Rainbird R.H., Stern R.A., Khudoley A.K., Kropachev A.P., Heaman L.M., Sukhorukov V.I. U-Pb geochronology of Riphean sandstone and gabbro from southeast Siberia and its bearing on the Laurentia-Siberia connection // *Earth and Planetary Science Letters*. 1998. V. 164. P. 409–420. DOI:10.1016/S0012-821X(98)00222-2.
10. Khudoley A., Chamberlain K., Ershova V., Sears J., Prokopiev A., MacLean J., Kazakova G., Malyshev S., Molchanov A., Kullerud K., Toro J., Miller E., Veselovskiy R., Li A., Chipley D. Proterozoic supercontinental restorations: Constraints from provenance studies of Mesoproterozoic to Cambrian clastic rocks, eastern Siberian Craton // *Precambrian Research*. 2015. V. 259. P. 78–94. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2014.10.003>.
11. Ludwig K.R. Isoplot 3.00. Berkeley Geochronology Center Special Publication. 2003. No. 4. 70 p.
12. Parfenov L.M., Berzin N.A., Khanchuk A.I., Badarch G., Belichenko V.G., Bulgatov A.N., Dril' S.I., Kirillova G.L., Kuz'min M.I., Nokleberg U., Prokop'ev A.V., Timofeev V.F., Tomurtogoo O., Yan' Kh. Model' formirovaniya orogennykh pojasov Tsentral'noj i Severo-Vostochnoj Azii // *Tikhookeanskaya geologiya*. 2003. № 6. S. 7–42.
13. Prokopiev A.V., Toro J., Hourigan J.K., Bakharev A.G., Miller E.L. Middle Paleozoic-Mesozoic boundary of the North Asian craton and the Okhotsk terrane: new geochemical and geochronological data and their geodynamic interpretation // *Stephan Mueller Spec. Publ. Ser.* 2009. V. 4. P. 71–84.
14. Kuzmin V.K., Chukhonin A.P., Shuleshko I.K. Etapy metamorficheskoy evolyutsii porod kristallicheskogo fundamenta Kukhtujskogo podnyatiya (Okhotskij massiv) // *Doklady RAN*. 1995. T. 342, № 6. S. 789–791.
15. Kuzmin V.K., Belyatskij B.V., Naumov M.V. Pervye Sm-Nd dannye o pozднеordoviskom vozraste granitoidov Verkhnemajskogo podnyatiya (Okhotskij massiv) // *Doklady RAN*. 2003, T. 390, № 2. S. 228–232.
16. Smelov A.P., Timofeev V.F. The age of the North Asian Cratonic basement: an overview // *Gondwana Research*. 2007. V. 12. P. 279–288. DOI:10.1016/j.gr.2006.10.017.
17. Parfenov L.M. Kontinental'nye okrainy i ostrovnye dugi mezozoid Severo-Vostoka Azii. Novosibirsk: Nauka, 1984. 192 s.
18. Tsygankov A.A., Udoratina O.V., Burmakina G.N., Grove M. Novye dannye U-Pb datirovaniya tsirkonov i problema dlitel'nogo formirovaniya Angaro-Vitimskogo batolita // *Doklady RAN*. 2012. T. 447, № 2. S. 204–209. DOI:10.1134/S1028334X12110141.
19. Biakov A.S., Vedernikov I.L. Sravnenie litokhimicheskikh kharakteristik glinistyx porod permi i nizhnego triasa yuzhnoj chasti Yano-Kolymskoj skladchatoj sistemy v svyazi s pristutstviem v nikh piroklasticheskogo materiala // *Vestnik SVNTs DVO RAN*. 2013. № 3. S. 3–10.
20. Kuzmin V.K., Glebovitskij V.A., Proskurnin V.F., Bogomolov E.S., Zelepugin V.N., Rodionov N.V., Yurchenko Yu.Yu. Paleoproterozojskie granitoidy kristallicheskogo fundamenta Yurovskogo podnyatiya (Okhotskij massiv): pervye geokhronologicheskie U-PB-SHRIMP-II- i izotopno-geokhimicheskie Nd-Sr-dannye // *Doklady RAN*. 2018. T. 478, № 2. S. 196–200. DOI:10.7868/S0869565218020160.
21. Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Wingate M.T.D., Mazukabzov A.M., Pisarevsky S.A., Sklyarov E.V., Stanevich A.M. A one-billion-year gap in the Precambrian history of the southern Siberian craton and the problem of the Transproterozoic supercontinent // *American Journal of Science*. 2010. V. 310, no. 9. P. 812–825. DOI:10.2475/09.2010.03.

Поступила в редакцию 10.12.2018

Об авторах

ПРОКОПЬЕВ Андрей Владимирович, кандидат геолого-минералогических наук, зам. директора, зав. лабораторией, Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия, <http://orcid.org/0000-0003-0985-9535>, prokopiev@diamond.ysn.ru;

ТОРО Хайме, доктор, доцент, Университет Западной Виргинии, 330 Brooks Hall PO Box 6300 Morgantown, WV 26506-6300, USA, jtoro@wvu.edu;

МИЛЛЕР Элизабет Луиза, PhD, профессор, Стэнфордский университет, Bldg. 320, Rm. 205, Stanford, California 94305-2115, USA, elmiller@stanford.edu.

About the authors

PROKOPIEV Andrei Vladimirovich, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Deputy Director, Head of Laboratory, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, 39 Lenina Ave., Yakutsk, 677980, Russia, <http://orcid.org/0000-0003-0985-9535>, prokopiev@diamond.ysn.ru;

TORO Jaime, Doctor, Associate Professor, West Virginia University, 330 Brooks Hall PO Box 6300 Morgantown, WV 26506-6300, USA, jtoro@wvu.edu;

MILLER Elizabeth Louise, PhD, Professor, Stanford University, Bldg. 320, Rm. 205, Stanford, California 94305-2115, USA, elmiller@stanford.edu.