



FIRST DETRITAL ZIRCON GEOCHRONOLOGY DATA FOR CLASTIC ROCKS OF THE EAST SAKHALIN ACCRETIONARY TERRANE

I.A. Alexandrov ✉, V.V. Ivin , A.I. Malinovsky, S.Yu. Budnitskiy

Far East Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 159 100-letiya Ave, Vladivostok 690022, Russia

ABSTRACT. First detrital zircon geochronology data and results of geochemical studies for clastic rocks of the Rymnik and Nabil zones of the East Sakhalin accretionary terrane, located within the region of the East Sakhalin Mountains, are presented. The studies have been carried out at the Shared Research Facilities of Far East Geological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences in Vladivostok. The established geochemical features suggest that the source of the clastic material of the zones was felsic rocks of the deeply eroded continental island arc or arcs. Although the geochemical characteristics are similar, there are sharp differences between the detrital zircons' age distribution patterns of rocks of these zones. In the sandstone of the Nabil zone, 75 % of the zircon grains are of the middle Cretaceous age (94–108 Ma) with a peak of 96 Ma, 15 % are the Middle Permian-Early Jurassic, and 10 % are the Precambrian (mainly Paleoproterozoic). The sandstone of the Rymnik zone has a more complex (polymodal) pattern of the detrital zircon age distribution, with a significant contribution of the Precambrian grains (37 %). Most of the grains belong to the Early Jurassic (peak 196 Ma) and the Early Cretaceous (peak 137 Ma), with 47 % of the Mesozoic grains. The likely provenances of the clastic material were the Middle Cretaceous volcanic arcs of the Asian eastern margin and older complexes of the continent.

KEYWORDS: East Sakhalin accretionary terrane; accretionary complex; detrital zircon; turbidities

FUNDING: The work has been done under financial support of RFBR as part of research project 19-05-00440.

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Igor A. Alexandrov, alexandrov@fegi.ru

Received: December 9, 2021

Revised: December 21, 2021

Accepted: December 30, 2021

FOR CITATION: Alexandrov I.A., Ivin V.V., Malinovsky A.I., Budnitskiy S.Yu., 2022. First Detrital Zircon Geochronology Data for Clastic Rocks of the East Sakhalin Accretionary Terrane. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2s), 0612. doi:10.5800/GT-2022-13-2s-0612

ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ ПО U/Pb ДАТИРОВАНИЮ ДЕТРИТОВЫХ ЦИРКОНОВ ИЗ ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД ВОСТОЧНО-САХАЛИНСКОГО АККРЕЦИОННОГО ТЕРРЕЙНА

И.А. Александров, В.В. Ивин, А.И. Малиновский, С.Ю. Будницкий

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, 690022, Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, 159, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе представлены первые результаты U/Pb датирования детритовых цирконов и исследования геохимии терригенных пород Рымникской и Набильской зон Восточно-Сахалинского аккреционного террейна (район Восточно-Сахалинских гор), выполненных в Центре коллективного пользования ДВГИ ДВО РАН. Установленные геохимические особенности позволяют предположить, что источником терригенного материала пород обеих зон являлись кислые породы глубоко эродированной эпиконтинентальной островной дуги (дуг). При сходстве геохимических характеристик породы Набильской и Рымникской зон резко различаются по спектрам распределения возрастов детритовых цирконов. В песчанике Набильской зоны 75 % зерен циркона имеют среднемеловой возраст (94–108 млн лет) с пиком 96 млн лет, 15 % – среднепермско-раннеюрский возраст и 10 % – докембрийский (главным образом палеопротерозойский). Песчаник Рымникской зоны имеет более сложный (полимодальный) спектр распределения возрастов детритового циркона, со значительным вкладом докембрийских зерен (37 %). Большинство зерен имеют раннеюрский (пик 196 млн лет) и раннемеловой (пик 137 млн лет) возраст при 47 % мезозойских зерен. Вероятными источниками терригенного материала являлись среднемеловые магматические дуги восточной окраины Азии и более древние комплексы континента.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Восточно-Сахалинский аккреционный террейн; аккреционный комплекс; детритовые цирконы; турбидиты

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-00440.

1. ВВЕДЕНИЕ

Восточная часть Центрального Сахалина (район Восточно-Сахалинских гор) имеет сложное геологическое строение, что стало причиной появления различных вариантов тектонического районирования данной территории. А.Э. Жаров выделил здесь единый Восточно-Сахалинский составной аккреционный террейн (рис. 1, а) [Zharov, 2005]. В интерпретации А.И. Ханчука [Khanchuk, 2006] позднемеловые вулканогенно-осадочные образования п-ова Терпения и к северу от него составляют одноименный с полуостровом самостоятельный террейн – фрагмент островной дуги (рис. 1, а). К северу и западу от террейна Терпения А.И. Ханчук выделил позднемеловой Набильский аккреционный террейн, граничащий на западе по субмеридиональному разлому со среднепозднемеловым Аниво-Гомонским аккреционным террейном [Khanchuk, 2006]. При этом в состав Аниво-Гомонского террейна, как и Восточно-Сахалинского составного аккреционного террейна по А.Э. Жарову [Zharov, 2005], включены тектонически ограниченные блоки метаморфических пород верхнелангерийского комплекса, прорываемых позднеэоценовыми гранитоидами [Zhao et al., 2019] (рис. 1, а, б). Парасланцы этого метаморфического комплекса традиционно считаются продуктами динамометаморфизма залегающих восточнее осадочных пород остринской (J_3-K_1) и хойской (K_{1-2}) свит (рис. 1, б) [State Geological Map..., 2016].

С.В. Зябрев [Zyabrev, 2011] рассматривает Аниво-Гомонский и Набильский террейны в качестве Восточно-

Сахалинской аккреционной призмы, также включая сюда метаморфические образования. Он провел структурные, лито- и биостратиграфические исследования протяженного разреза неметаморфизованных отложений Восточно-Сахалинских гор [Zyabrev, 2011]. На основании детального изучения радиолярий возраст турбидитов Набильской зоны (западная часть – район распространения остринской и хойской свит (рис. 1, б)) им был установлен как среднепозднеальбский, а Рымникской зоны (восточная часть – район распространения березовской и богатинской свит (рис. 1, б)) – как среднесеноманский [Zyabrev, 2011].

Нами ранее были изучены детритовые цирконы из метаосадочных пород черносланцевого и слюдяно-кварцевого подкомплексов верхнелангерийского метаморфического комплекса и установлены нижние пределы осадконакопления протолитов, равные 50 и 70 млн лет соответственно [Zhao et al., 2018]. Таким образом, протолиты парасланцев, слагающих тектонически ограниченные блоки в западной части Восточно-Сахалинских гор (рис. 1), не являются когенетичными меловой аккреционной призмой Восточного Сахалина. В связи с этим в данной работе мы рассматриваем Восточно-Сахалинский аккреционный террейн (BCAT) Центрального Сахалина, в который не включаем выходы верхнелангерийского метаморфического комплекса и террейн Терпения (рис. 1, а).

В работе представлены первые результаты U/Pb датирования детритовых цирконов и исследования геохимии терригенных пород Рымникской и Набильской

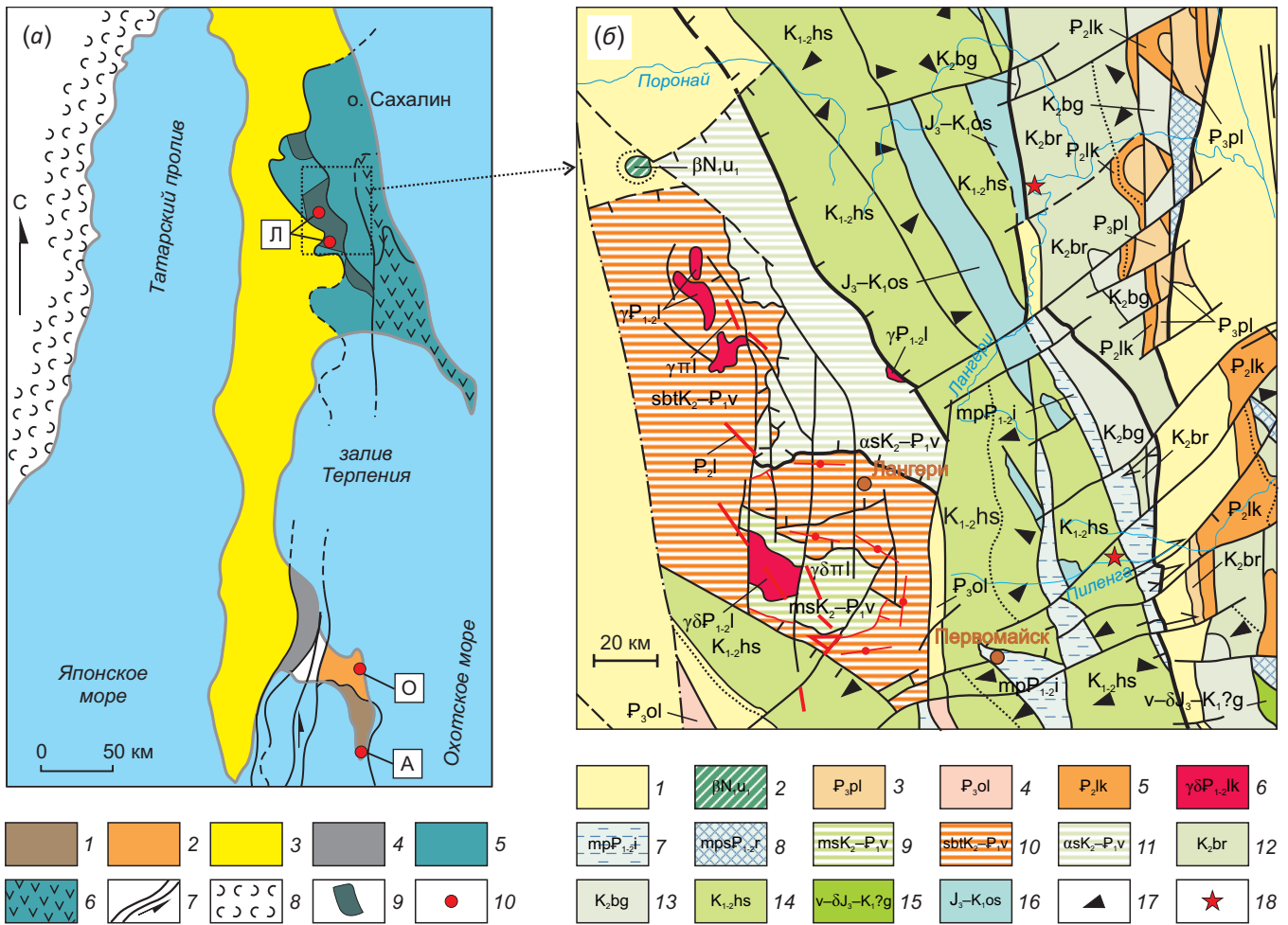


Рис. 1. Геологическая позиция описываемых комплексов.

(а) – тектоническое районирование о. Сахалин ([Zharov, 2005], с изменениями). 1 – апт-маастрихтский Тонино-Анивский террейн; 2 – кампан-раннеэоценовый Озерский террейн; 3 – апт-палеоценовый турбидитовый Западно-Сахалинский террейн; 4 – мел-среднеэоценовый Сусунайский субдукционный метаморфический террейн; 5–6 – Восточно-Сахалинский составной аккреционный террейн, 6 – поздне меловой островодужный террейн Терпеня [Khanchuk, 2006]; 7 – Мерейская шовная сдвиговая зона; 8 – Восточно-Сихотэ-Алинский вулканоплутонический пояс; 9 – выходы пород верхнелангерийского метаморфического комплекса; 10 – места выхода гранитоидных массивов (вне масштаба); Л – лангерийского гранодиоритового комплекса, О – озерского гранодиоритового комплекса, А – анивского гранитного комплекса.

(б) – фрагмент государственной геологической карты масштаба 1:1000000 ([State Geological Map..., 2016], с изменениями). 1 – миоценовые и миоцен-плиоценовые отложения; 2 – первая фаза усковского дацит-долеритового комплекса гипабиссальных малых интрузий; 3 – пиленгская свита; 4 – оленереченская толща; 5 – люкаминская свита; 6 – лангерийский гранодиоритовый комплекс; 7 – ивашкинский тектоногенный комплекс (терригенный полимиктовый меланж); 8 – раkitинский тектоногенный комплекс (серпентинитовый полимиктовый меланж); 9–11 – верхнелангерийский метаморфический комплекс: 9 – черносланцевый подкомплекс, 10 – слюдяно-кварцевый подкомплекс, 11 – зеленосланцевый подкомплекс; 12 – березовская свита; 13 – богатинская свита; 14 – хойская свита; 15 – геранский габбро-диоритовый комплекс плутонический; 16 – остринская свита; 17 – олистостромы; 18 – места отбора образцов.

Fig. 1. Geologic settings of the described complexes.

(a) – tectonic units of Sakhalin Island (after [Zharov, 2005] with modifications). 1 – Aptian-Maastrichtian Tonin-Aniva terrane; 2 – Campanian – Early Eocene Ozerskii terrane; 3 – Aptian-Paleocene West Sakhalin turbidite terrane; 4 – Cretaceous – Middle Eocene Susunai subduction-related metamorphic terrane; 5–6 – East Sikhote-Alin composite accretion terrane, 6 – Late Cretaceous Terpenya island-arc terrane [Khanchuk, 2006]; 7 – Merei suture-type shear zone; 8 – East Sikhote-Alin volcano-plutonic belt; 9 – exposure of the Verkhnelangeri metamorphic complex; 10 – outcrops of granitic plutons (out of scale); Л – the Langeri granodiorite complex, О – the Ozerskii granodiorite complex, А – the Aniva granitic complex.

(b) – fragment of the State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:1000000 ([State Geological Map..., 2016] with modifications). 1 – Miocene and Miocene-Pliocene deposits; 2 – the early stage of the Uskovskii hypabyssal dacite-dolerite intrusive complex; 3 – the Pilengskaya Formation; 4 – the Olenerechenskaya strata; 5 – the Lyukaminskaya Formation; 6 – the Langeri granodiorite complex; 7 – the Ivashkinskii tectonogenic complex (terrigenous polymictic melange); 8 – the Rakitsinskii tectonogenic complex (serpentine polymictic melange); 9–11 – the Verkhnelangeri metamorphic complex: 9 – black schist subcomplex, 10 – mica-quartz subcomplex, 11 – greenschist subcomplex; 12 – the Berezovskaya Formation; 13 – the Bogatinskaya Formation; 14 – the Khoyskaya Formation; 15 – the Geranskii gabbro-diorite plutonic complex; 16 – the Ostrinskaya Formation; 17 – olistostroms; 18 – sample locations.

зон ВСАТ. Полевые исследования были проведены в пределах двух участков: 1) разрез хойской и остринской свит Набильской зоны в обнажениях автодороги Трудовое – Первомайск в верховье р. Пиленга; 2) разрез березовской и богатинской свит Рымникской зоны в среднем течении р. Лангери.

2. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ

Изученные образцы относятся в основном к хойской (Набильская зона) и березовской (Рымникская зона) свитам [State Geological Map..., 2016].

Отложения хойской свиты представлены горизонтами разномерных песчаников, алевролитов и аргиллитов. Песчаники и глинисто-алевритовые породы часто образуют пачки тонкого ритмичного переслаивания, которые, в свою очередь, чередуются с пачками линзовидно-слоистых алевролитов и аргиллитов. Основной объем свиты занимают песчаники, имеющие самую различную размерность: от мелко- до крупнозернистых и даже гравелистых. Сортировка обломочного материала наилучшая в наиболее тонких разностях, но с увеличением размерности она ухудшается. По петрографическому составу песчаники относятся к кварц-полевошпатовым и полевошпат-кварцевым грауваккам. Алевролиты тонкослоистые и линзовидно-слоистые, реже – массивные, в обломочной части содержат зерна кварца, плагиоклазов, лейсты биотита и мусковита, обломки яшм.

Березовская свита сложена преимущественно алевролитами и аргиллитами, содержащими прослойки песчаников, пачками ритмичного переслаивания песчаников, алевролитов и аргиллитов, а также редкими горизонтами и линзами кремнисто-глинистых пород. Песчаники, как правило, мелко- и среднезернистые, гораздо реже – крупнозернистые. Сортировка обломочного материала плохая, реже – средняя. Обломки угловатые и угловато-окатанные, изометричные и вытянутые. По петрографическому составу породы относятся к полевошпат-кварцевым грауваккам. Алевролиты массивные, реже слоистые. По размеру от тонкоалевритовых до песчаных. Обломки полуокатанные и угловатые, представлены кварцем, плагиоклазом, рудными минералами.

К настоящему времени получены результаты датирования детритовых цирконов в двух образцах турбидитов хойской (С20-27) и березовской (С20-48) свит.

Образец С20-27 – песчаник мелко- и среднезернистый. Сортировка плохая, зерна угловатые и угловато-окатанные, в основном изометричные, реже – слабо удлинённые. Цемент порово-пленочный, глинистый. Кварца в породе 29 %, он в основном монокристаллический, реже поликристаллический, изометричный либо слабоудлинённый. Полевых шпатов 41 %. Это преимущественно слабовытянутые, таблитчатые, реже изометричные зерна кислых плагиоклазов (26 % всех полевых шпатов), среди которых преобладают альбит и олигоклаз (в сумме 10 %). В небольшом количестве присутствуют зерна основных и средних плагиоклазов,

а также калиевых полевых шпатов (5 %). Обломки пород в сумме составляют 30 % и представлены примерно в равных количествах (8–10 %) кремнистыми, терригенными и эффузивными породами, редко встречаются слюдястые сланцы.

С20-48 – песчаник среднезернистый, полимиктовый. Степень сортированности обломочного материала средняя, зерна в основном угловато-окатанные, реже угловатые и окатанные. Наблюдаются крупные (до 2.5 мм) вытянутые, ориентированные в одном направлении обрывки глинистого вещества. Цемент порово-пленочный, глинисто-серцитовый. В обломочной части преобладает (37 %) монокристаллический, реже – слабовытянутый кварц. Полевые шпаты представлены в основном изометричными и слабовытянутыми зернами кислых плагиоклазов (27 %), значительно более редки основные и средние плагиоклазы и калишпаты (5 %). Среди обломков пород преобладают основные – средние вулканиты, а также кварциты и слюдяные сланцы (по 9 %). Обломочные породы и кремни более редки (5–6 %).

Все аналитические работы выполнялись в Центре коллективного пользования ДВГИ ДВО РАН.

Для определения валового элементного состава пород навески исследуемых образцов были подвергнуты предварительному обжигу в муфельной печи при $t=550\text{ }^{\circ}\text{C}$ с доступом воздуха. Для разложения образцов использовалась процедура сплавления с метаборатом лития с последующим растворением плавня с помощью смеси азотной и плавиковой кислот. Из полученных растворов отбирали аликвотные части: 10 мл для определения содержания петрогенных элементов на атомно-эмиссионном с индуктивно связанной плазмой спектрометре (iCAP 7600 Duo) и 2 мл для определения содержания микроэлементов на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (Agilent 7500c). Детальнее методика описана в статье [Blokhin et al., 2022].

Определение содержания H_2O , PPH , SiO_2 выполнено методом гравиметрии, а содержания закисного железа – методом титриметрии.

Выделение цирконов проводилось по методике, включающей несколько этапов дробления и просеивания породы, сепарацию по магнитным свойствам и плотности (с использованием бромформа). Затем зерна вручную отбирались под биноклем. В образцах, где количество зерен циркона превышало достаточное для получения достоверной статистики, отбор цирконов для датирования осуществлялся случайным образом.

Для выбора точек анализа на поверхности зерен использовались катодолюминесцентные изображения, полученные с использованием электронно-зондового микроанализатора JEOL JXA-8100, дополнительно оснащенного катодолюминесцентной приставкой Gatan MiniCL.

Исследование выполнено на квадрупольном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой Agilent 7500a. Удаление анализируемого материала проводилось с помощью системы лазерной абляции UP-213

(New Wave Research), совмещенной с масс-спектрометром. Диаметр абляционного кратера составлял 40 мкм. Исследуемый материал из ячейки образца извлекался с помощью гелия, а в горелку ИСП-МС транспортировался потоком смеси газов гелия и аргона. U-Pb отношения нормализовались на соответствующие значения изотопных отношений стандартного циркона TEMORA, возраст которого принят равным 416.75 млн лет [Black et al., 2003]. Измеренные величины обрабатывались с помощью программ «Glitter v. 4.4.4» (Access Macquarie Ltd). Технические детали методики описаны в работах [Kiselev et al., 2008; Jackson et al., 2004].

Для обработки данных по возрастам детритовых цирконов и построения диаграмм (рис. 2) использовалась программа detritalPy [Sharman et al., 2018]. Определение статистически значимых пиков и интервалов проводилось при помощи приложения BAD-ZUPA [Furukawa, 2020].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Получены данные по химическому составу 20 образцов терригенных пород Набильской и 13 образцов Рымникской зоны. Породы обеих зон в основном имеют сходные вариации состава петрогенных элементов: SiO₂ от 64 до 73 вес. %, Al₂O₃ 14–19 вес. %, Fe₂O₃ 4–7 вес. %, MgO 1.3–2.7 вес. %, Ca₂O 0.2–2.4 вес. %, Na₂O 1.2–5.1 вес. %, K₂O 0.8–4.0 вес. %. Согласно индексу химических изменений [Nesbitt, Young, 1982] породы относятся к умеренно, реже слабыветрелым (CIA 57–70). При этом по индексу изменчивости состава [Cox et al., 1995] слабыветрелые попадают в поле незрелых пород, а умеренно выветрелые – главным образом в поле зрелых (ICV 0.86–1.14). На классификационной диаграмме М. Херрона [Herron, 1988] большинство исследованных образцов по химическому составу попадает в поле граувакк.

Общее содержание редких земель в породах ВСАТ находится в пределах 86–185 ppm. Некоторые образцы имеют небольшую отрицательную аномалию Eu. По содержанию маломобильных элементов породы близки к составу верхней континентальной коры, за исключением отрицательных аномалий Nb, Ta, Hf и в меньшей степени Zr.

Зерна цирконов из проб представлены в основном идиоморфными бесцветными или слабоокрашенными кристаллами с короткопризматическими и дипирамидальными очертаниями, а также их обломками. Размер обычно составляет 80–150 мкм, иногда достигая 200 мкм. В катодоллюминесцентном изображении большинство цирконов имеет тонкую осцилляторную зональность, заключающуюся в чередовании концентрических полос темного и светлого оттенка. Некоторая часть древних зерен цирконов средне или хорошо окатана и не имеет четко выраженной зональности. Зерна циркона образца C20-27 более крупные и имеют лучшую сохранность.

Для образца C20-48 (березовская свита, Рымникская зона) получены 66 конкордантных датировок от 91 до 2887 млн лет (рис. 2). Большинство зерен имеют

раннеюрский и раннемеловой возраст, а рассчитанные достоверные пики составляют 137, 196, 290, 392 и 1879 млн лет. Из-за небольшого размера, трещиноватости и изменчивости состава (зональности) для большого количества зерен не было получено достоверных датировок (всего было исследовано 140 зерен).

Для цирконов из образца C20-27 (хойская свита, Набильская зона) получены 112 конкордантных датировок от 94 до 2599 млн лет (рис. 2). Большая часть цирконов относится к пику 96 млн лет (средний мел) с небольшими статистически значимыми пиками 174, 227 и 1904 млн лет.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

На диаграммах La/Sc vs. Th/Co [Cullers, 2002] и Zr vs. TiO₂ [Hayashi et al., 1997] точки составов терригенных пород ВСАТ попадают в поля, предполагающие кислые породы в качестве их источника. Согласно диаграмме Hf vs. La/Th [Floyd, Leveridge, 1987] они попадают в поле кислого островодужного источника. На треугольных микроэлементных диаграммах (La-Th-Sc, Th-Sc-Zr/10, Th-Co-Zr/10) [Bhatia, Crook, 1986] обстановка осадконакопления для изученных пород диагностируется как эпиконтинентальная островная дуга. По составу обломков (F-Q-L) на диаграмме Дикенсона и Сакзека [Dickinson, Suczek, 1979] точки составов изученных образцов занимают поле расчлененных глубоко эродированных магматических дуг. При этом на всех использованных диаграммах точки образцов Набильской и Рымникской зон ВСАТ вместе образуют единые рои.

Несмотря на сходство геохимических характеристик, породы Набильской и Рымникской зон резко различаются по спектрам распределения возрастов детритовых цирконов (рис. 2). В песчанике Набильской зоны 75 % зерен циркона имеют среднемеловой возраст (94–108 млн лет) и лишь 10 % – докембрийский (главным образом палеопротерозойский). Песчаник Рымникской зоны имеет более сложный (полимодальный) спектр распределения возрастов детритового циркона со значительным вкладом докембрийских зерен (37 %) и наиболее выраженным раннеюрским пиком (196 млн лет).

Для сравнения на рис. 2 представлены спектры полученных ранее U/Pb возрастов детритовых цирконов из метаморфических пород верхнелангерийского комплекса Центрального Сахалина (см. рис. 1, б) [Zhao et al., 2018], а также миоценового песчаника холмской свиты (Юго-Западный Сахалин) и современного песка р. Поронай (Центральный Сахалин) [Zhao et al., 2017]. Как видно из сопоставления, четкого сходства спектров детритовых возрастов с другими выборками по о. Сахалин не наблюдается. При этом в референсных выборках в разном количестве присутствуют цирконы всех полученных для ВСАТ интервалов возраста (рис. 2). Интересно отсутствие в породах ВСАТ цирконов раннепалеозойского возраста (около 500 млн лет), обычно характерных для мезозойских аккреционных комплексов региона.

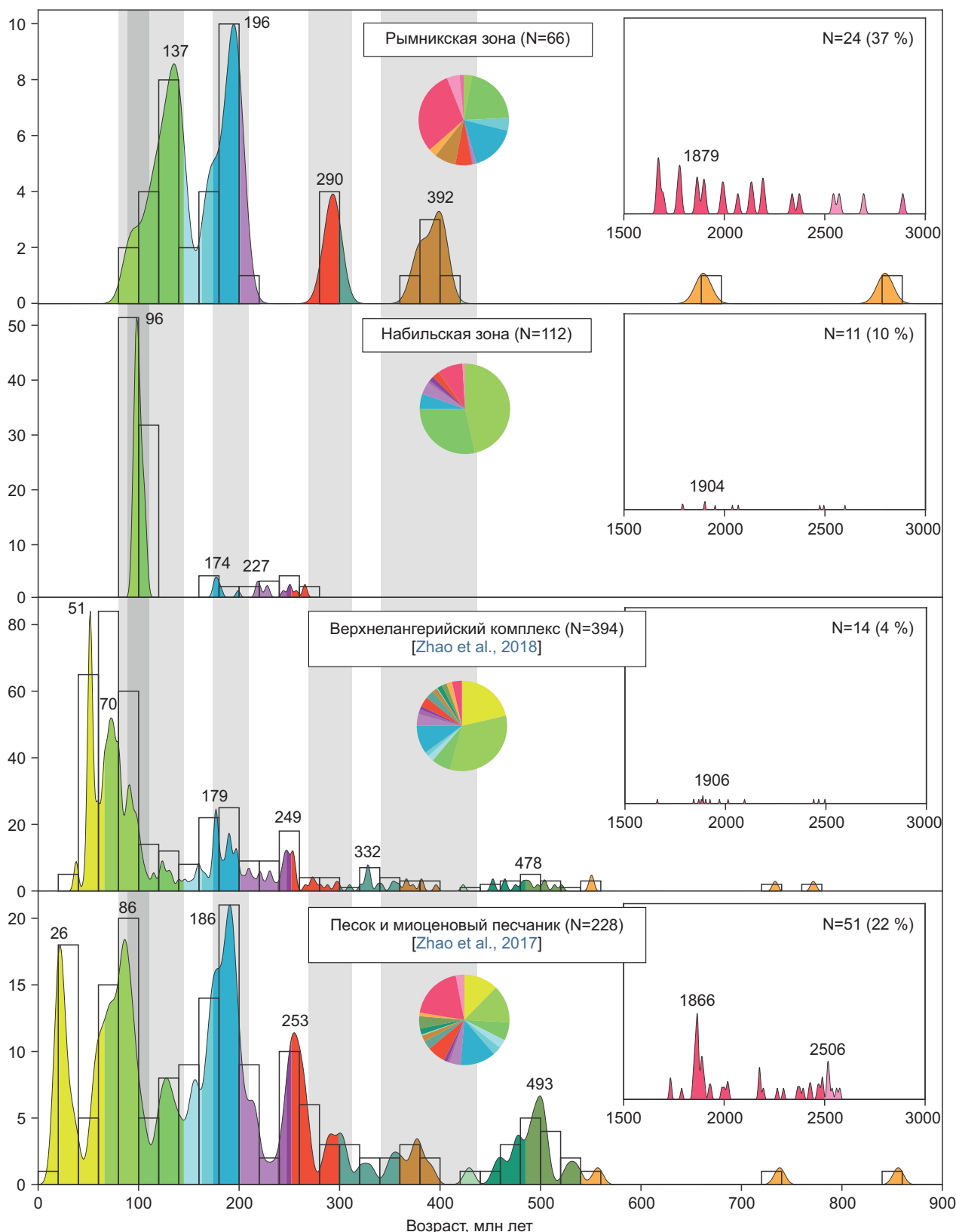


Рис. 2. Распределение значений возраста детритовых цирконов (кривые ядерной оценки плотности и гистограммы) образцов о. Сахалин: песчанников Рымникской и Набильской зон (собственные данные), метасадочных пород верхнелангерийского комплекса, современного песка р. Поронай и миоценового песчаника холмской свиты.

Fig. 2. Distribution of detrital ages (Kernel density estimate and histograms) for Sakhalin samples: Rymnik and Nabil zones (this paper), metasedimentary rocks of Verhnelangeri complex, modern sand of the Poronay river and Miocene sandstone of Kholmsk Formation.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что вероятными источниками терригенного материала для осадочных пород ВСАТ являлись среднemelовые эпиконтинентальные магматические дуги восточной окраины Азии и более древние комплексы континента. Для подтверждения и уточнения данного вывода планируется выполнить датирование детритовых цирконов большего количества образцов ВСАТ.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят сотрудников ФГБУ «Сахалинское УГМС» и лично А.С. Каргову, а также А.Ю. Шонина за помощь в проведении полевых работ.

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

8. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Bhatia M.R., Crook K.A.W., 1986. Trace Element Characteristics of Graywackes and Tectonic Setting Discrimination of Sedimentary Basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 92, 181–193. <https://doi.org/10.1007/BF00375292>.

Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., Aleinikoff J.N., Davis D.W., Korsch R.J., Foudoulis C., 2003. TEMORA 1: A New Zircon Standard for Phanerozoic U–Pb Geochronology. *Chemical Geology* 200 (1–2), 155–170. [https://doi.org/10.1016/S009-2541\(03\)00165-7](https://doi.org/10.1016/S009-2541(03)00165-7).

Blokhin M.G., Velivetskaya T.A., Vovna G.M., Zarubina N.V., Ivanov V.V., Karabtsov A.A. Shared Research Facilities "Primorsky Centre for Local Elemental and Isotope Analysis" of FEGI FEB RAS: Experience of the Functioning and Main Areas of Research. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (2), 0578 (in Russian) [Блохин М.Г., Зарубина Н.В., Иванова Ю.М., Михайлик П.Е., Иванов В.В. ЦКП "Приморский центр локального элементного и изотопного анализа" ДВГИ ДВО РАН: опыт функционирования и основные направления исследований // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. 0578]. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0578>.

Cox R., Lowe D.R., Cullers R.L., 1995. The Influence of Sediment Recycling and Basement Composition on Evolution of Mudrock Chemistry in the Southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59 (14), 2919–2940. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00185-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00185-9).

Cullers R.L., 2002. Implications of Elemental Concentrations for Provenance, Redox Conditions, and Metamorphic Studies of Shales and Limestones near Pueblo, CO, USA. *Chemical Geology* 191 (4), 305–327. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00133-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00133-X).

Dickinson W.R., Suczek C.A., 1979. Plate Tectonics and Sandstone Compositions. *AAPG Bulletin* 63 (12), 2164–2182. <https://doi.org/10.1306/2F9188FB-16CE-11D7-8645000102C1865D>.

Floyd P.A., Leveridge B.E., 1987. Tectonic Environment of the Devonian Gramscatho Basin, South Cornwall: Framework Mode and Geochemical Evidence from Turbiditic Sandstones. *Journal of the Geological Society* 144, 531–542. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.144.4.0531>.

Furukawa T., 2020. A new Evaluation Protocol for Detrital Zircon: BAD-ZUPA (v0.1). <https://doi.org/10.5281/zenodo.4138657>.

Hayashi K.-I., Fujisawa H., Holland H.D., Ohmoto H., 1997. Geochemistry of ~1.9 Ga Sedimentary Rocks from Northeastern Labrador, Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 61 (19), 4115–4137. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00214-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00214-7).

Herron M.M., 1988. Geochemical Classification of Terrigenous Sands and Shales from Core or Log Data. *Journal of Sedimentary Petrology* 58 (5), 820–829. <https://doi.org/10.1306/212F8E77-2B24-11D7-8648000102C1865D>.

Jackson S.E., Pearson N.J., Griffin W.L., Belousova E.A., 2004. The Application of Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry to in Situ U–Pb Zircon Geochronology. *Chemical Geology* 211 (1–2), 47–69. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.017>.

Khanchuk A.I. (Ed.), 2006. *Geodynamics, Magmatism and Metallogeny of the Eastern Regions of Russia. Book 1. Dal'nauka, Vladivostok, 572 p. (in Russian) [Геодинамика, магматизм и металлогения востока России / Ред. А.И. Ханчук. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с.]*.

Kiselev V.I., Vovna G.M., Mishkin M.A., Kovaleva E.Yu., 2008. Simultaneous Determination of Rare Earth Element Concentrations and U–Pb Isotopic Ratios of Single Crystal Zircon Grain by LA-ICPMS. In: *Analytics of Siberia and Far East. Proceedings of the VIII Scientific Conference (October 13–18, 2008)*. Publishing House of Tomsk Polytechnic University, Tomsk, p. 78–79 (in Russian) [Киселев В.И., Вовна Г.М., Мишкин М.А., Ковалева Е.Ю. Одновременное определение содержания редких элементов и U–Pb изотопных отношений цирконов по единичному зерну методом ЛА–ИСП–МС // Аналитика Сибири и Дальнего Востока: Материалы VIII научной конференции (13–18 октября 2008 г.). Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. С. 78–79].

Nesbitt H.W., Young G.M., 1982. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites. *Nature* 299, 715–717. <https://doi.org/10.1038/299715a0>.

Sharman G.R., Sharman J.P., Sylvester Z., 2018. DetritalPy: A Python-Based Toolset for Visualizing and Analysing Detrital Geo-Thermochronologic Data. *Depositional Record* 4 (2), 202–215. <https://doi.org/10.1002/dep2.45>.

State Geological Map of the Russian Federation, 2016. Far Eastern Series. Scale 1:1 000 000. Sheet M-54 (Alexandrovsk-Sakhalinsky). Explanatory Note. VSEGEI Publishing House, Saint Petersburg, 524 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Дальневосточная серия. Масштаб 1:1 000 000. Лист М-54 (Александровск-Сахалинский): Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2016. 524 с.].

Zhao P., Alexandrov I., Jahn B.-M., Ivin V., 2018. Timing of Okhotsk Sea Plate Collision with Eurasia Plate: Zircon U-Pb Age Constraints from the Sakhalin Island, Russian Far East. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 123 (9), 8279–8293. <https://doi.org/10.1029/2018JB015800>.

Zhao P., Alexandrov I., Jahn B., Liao J.-P., Ivin V., 2019. Late Eocene Granites in the Central Sakhalin Island (Russian Far East) and Its Implication for Evolution of the Sakhalin-

Hokkaido Orogenic Belt. *Lithos* 324–325, 684–698. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.12.002>.

Zhao P., Li J.-J., Alexandrov I., Ivin V., 2017. Involvement of Old Crustal Materials during Formation of the Sakhalin Island (Russian Far East) and Its Paleogeographic Implication: Constraints from Detrital Zircon Ages of Modern River Sand and Miocene Sandstone. *Journal of Asian Earth Sciences* 146, 412–430. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.06.031>.

Zharov A.E., 2005. South Sakhalin Tectonics and Geodynamics: A Model for the Cretaceous-Paleogene Accretion of the East Asian Continental Margin. *Russian Journal of Earth Sciences* 7, ES5002. <https://doi.org/10.2205/2005ES000190>.

Zyabrev S.V., 2011. Stratigraphy and Structure of the Central East Sakhalin Accretionary Wedge (Eastern Russia). *Russian Journal of Pacific Geology* 5, 313–335. <https://doi.org/10.1134/S1819714011040087>.