

УДК 550.4+551.7

## ИСТОЧНИКИ СНОСА НЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ И ВЕРХНЕПАЛЕОЗОЙСКИХ ТЕРРИГЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ ВОСТОЧНОГО ТАЙМЫРА: ПЕТРОГРАФИЧЕСКИЕ, ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ<sup>1</sup>

© 2020 г. Н. С. Прияткина<sup>1,2,\*</sup>, А. К. Худолей<sup>1</sup>, А. В. Купцова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Университет Ньюкасла, Ньюкасл, Австралия

\*e-mail: nadezhda.priyatkina@gmail.com

Поступила в редакцию 01.10.2019 г.

После доработки 26.03.2020 г.

Принята к публикации 17.05.2020 г.

Результаты петрографических, геохимических и изотопных исследований неопротерозойских и верхнепалеозойских песчаников Восточного Таймыра дополняют имеющиеся сведения об их генезисе и подтверждают их молассовую природу. Песчаники и аргиллиты становской и посадочнинской свит неопротерозоя сформировались преимущественно за счет размыва магматических и метаморфических комплексов с возрастом ~970–800 млн лет, а также более древних терригенных отложений. Песчаники верхнего палеозоя, представленные отложениями быррангской, соколинской и турузовской свит, характеризуются несколько более низкой степенью зрелости. Большинство из них сформировались за счет размыва магматических и метаморфических комплексов с возрастными ~500 и ~300 млн лет, однако отмечены также породы с более древним источником сноса. Возрасты наиболее молодых зерен обломочного циркона из верхнепалеозойских песчаников в одних случаях оказываются близкими ко времени осадконакопления, в других отличаются более чем на 100 млн лет. Это свидетельствует о том, что использовать максимальные возрасты осадконакопления для определения тектонической обстановки формирования осадочного бассейна следует с осторожностью.

*Ключевые слова:* Арктика, Таймыр, неопротерозой, палеозой, песчаник, моласса, обломочный циркон

DOI: 10.31857/S0869592X20060083

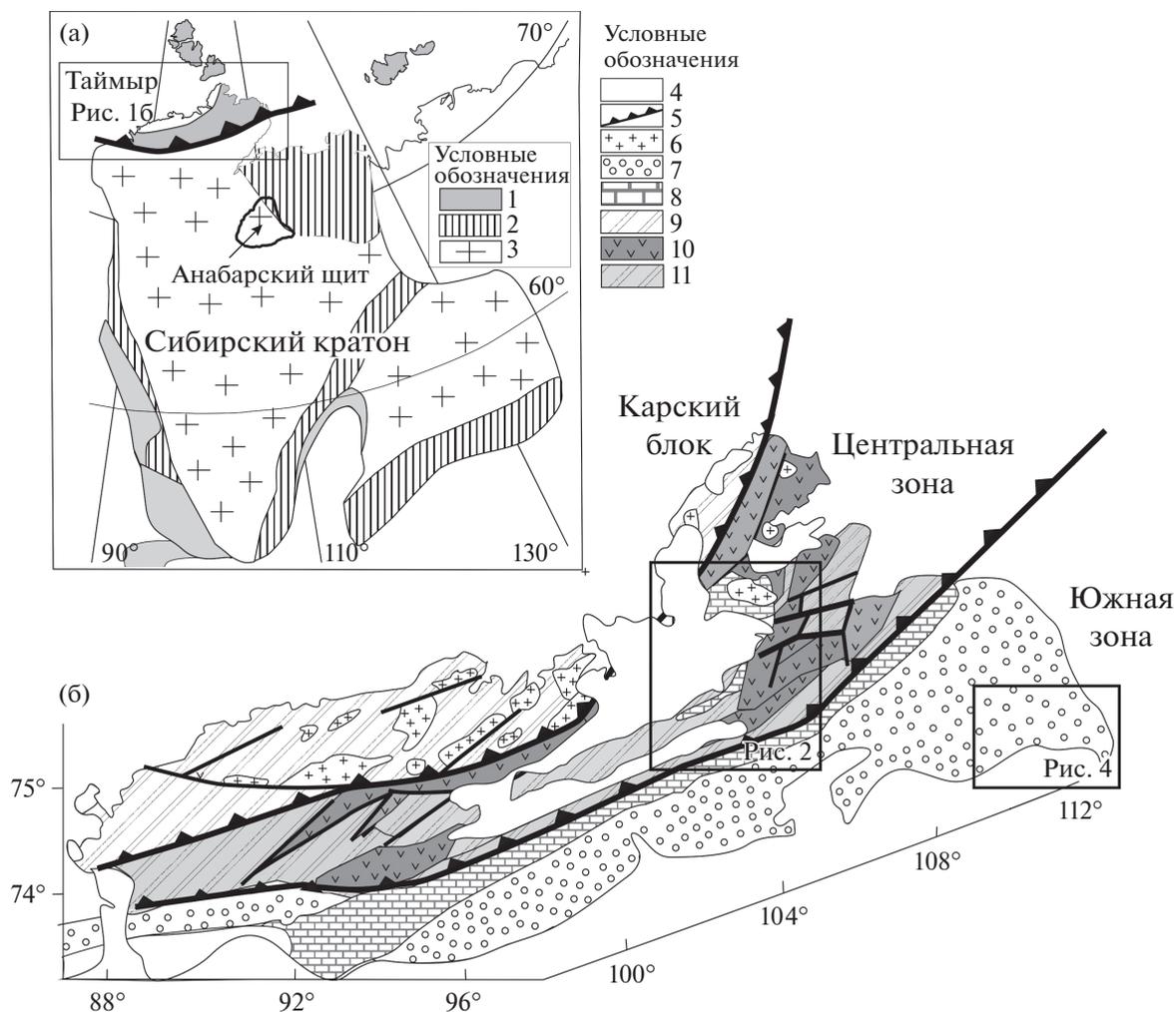
### ВВЕДЕНИЕ

Терригенные породы несут важную информацию об источниках сноса и тектонических обстановках, существовавших во время их накопления. Различным аспектам тектонической интерпретации их минералогического, геохимического и изотопного состава посвящена обширная литература (например, Dickinson et al., 1983; McLennan et al., 1993, 2003; Sawood et al., 2012; Gehrels, 2012, 2014; Маслов и др., 2015, 2016). Являясь продуктами разрушения растущего Таймырского складчато-надвигового сооружения, терригенные толщи неопротерозоя и верхнего палеозоя–мезозоя, входящие в его состав и обычно рассматриваемые как молассы (Верниковский, 1996), представляют собой важный источник информации о возрасте и составе блоков, участвующих в его строении, что, в свою очередь, может быть использовано при те-

стировании или уточнении палеогеографических реконструкций с участием Таймырского складчато-надвигового пояса, а также для выяснения его геологических взаимоотношений с другими крупными тектоническими структурами (например, Pease et al., 2001; Верниковский и др., 2013).

Таймырский складчато-надвиговой пояс обрамляет с севера Сибирский кратон (рис. 1а) таким образом, что продолжение орогена оказывается скрыто под акваторией Баренцева моря. Возможно, что Таймырский складчато-надвиговой пояс является самостоятельной геологической структурой. В то же время ряд геофизических и геологических данных указывает на то, что геологические комплексы, участвующие в его строении, формируют продолжение Уральского орогена, образовавшегося при коллизии палеоконтинентов Балтики, Сибири и Казахстана (Пучков, 2010). Кроме того, в пользу предполагаемого продолжения Уральского орогена в Таймырский складчато-надвиговой пояс свидетельствуют ранее проводившиеся исследования обломочного

<sup>1</sup> Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.31857/S0869592X20060083 для авторизованных пользователей.



**Рис. 1.** (а) Основные тектонические единицы фундамента Сибирского кратона с обрамлением (по Розен, 2003) и (б) строение Таймырского складчато-надвигового пояса (по Верниковский, 1996; Vernikovskiy, Vernikovskaya, 2001). 1 – неопротерозойские складчатые пояса; 2 – палеопротерозойские складчатые пояса; 3 – архейская континентальная кора; 4 – мезозойско-кайнозойский чехол; 5 – главные надвиги; 6 – граниты с возрастом 300–250 млн лет; 7 – верхнепалеозойский терригенный комплекс; 8 – палеозойские известняки и сланцы; 9 – турбидиты неопротерозойского и раннекембрийского возраста; 10 – неопротерозойские офиолиты и островодужные комплексы; 11 – неопротерозойские терригенные и карбонатные осадочные комплексы.

цирка в палеозойско-мезозойских молассовых отложениях Таймыра (Zhang et al., 2013). Аналогичным образом сравнение популяций обломочного циркона в более древних неопротерозойских молассовых отложениях Таймыра и Сибирской платформы (Priyatkina et al., 2017) было использовано для выяснения взаимоотношений этих структур.

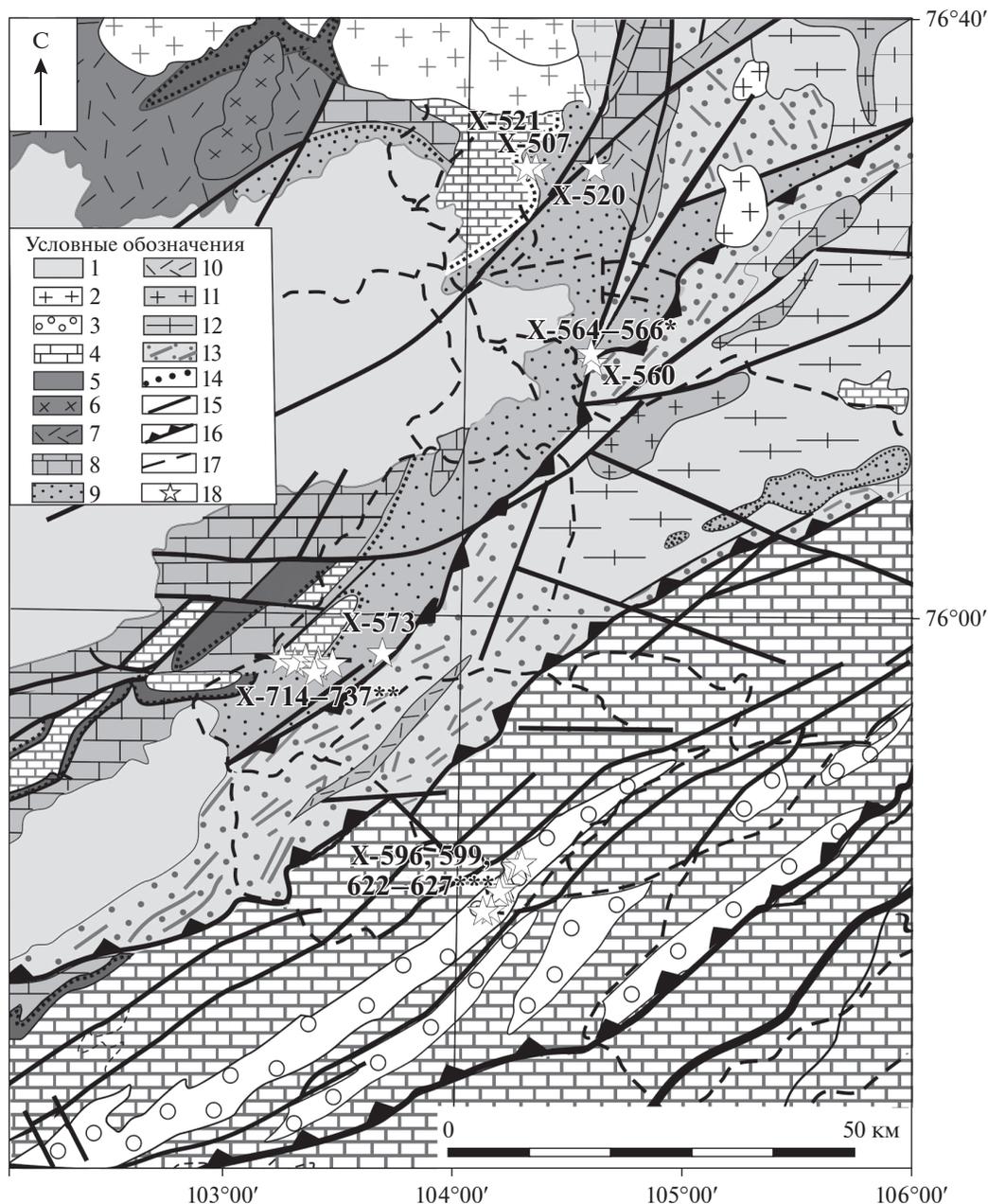
В статье представлены новые геохимические, петрографические и геохронологические данные, которые позволяют уточнить генезис и источники сноса неопротерозойских и палеозойских терригенных комплексов Восточного Таймыра.

### ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ

Таймырский складчато-надвиговой пояс традиционно разделяется на три основные тектониче-

ские зоны (рис. 16) – Южно-Таймырскую, Центрально-Таймырскую и Северо-Таймырскую. Они сложены геологическими комплексами, интерпретируемыми соответственно как фрагменты неопротерозойско-палеозойской пассивной окраины Сибирского палеоконтинента, неопротерозойского аккреционного пояса и Карского блока или микроконтинента (Зоненшайн и др., 1990; Уфлянд и др., 1991; Верниковский, 1996). Объекты, результаты исследования которых представлены в настоящей статье, расположены в Центрально-Таймырской и Южно-Таймырской зонах. Координаты изученных образцов и проб представлены в (Дополнительные материалы (ДМ)\_табл. 1).

Центрально-Таймырская зона представляет собой реликт неопротерозойского аккреционного пояса, располагавшийся на активной окраине Си-



**Рис. 2.** Упрощенная геологическая карта района р. Ленинградская на основе результатов геолого-съёмочных работ масштаба 1 : 1000000 (Государственная..., 2009, 2013), с изменениями авторов.

1 – мезозойские отложения; 2 – позднепалеозойские гранитоиды; 3 – верхнепалеозойский терригенный комплекс; 4 – палеозойский карбонатный комплекс; 5 – терригенно-карбонатный комплекс верхнего эдиакария и нижнего кембрия; 6 – гранитоиды эдиакарского возраста; 7 – вулканогенные отложения эдиакарского возраста; 8 – неопротерозойские известняки и доломиты колосовской свиты с терригенными отложениями посадочнинской свиты в кровле; 9 – терригенные отложения становской свиты; 10 – вулканогенные отложения неопротерозойской верхнеленинградской свиты; 11 – гранитоиды неопротерозойского возраста; 12 – метаморфизованные отложения октябрьской и ждановской толщ и их аналогов (мезопротерозой); 13 – высокотемпературные метаморфические террейны (мезопротерозой); 14 – угловое несогласие; 15 – разломы; 16 – надвиги; 17 – реки; 18 – точки отбора проб: X-564–566\*: X-564, X-565, X-566; X-714–737\*\*: X-714, X-716, X-717, X-719, X-720, X-722, X-724, X-727, X-733, X-735, X-737; X-622–627\*\*\*: X-622, X-624, X-627.

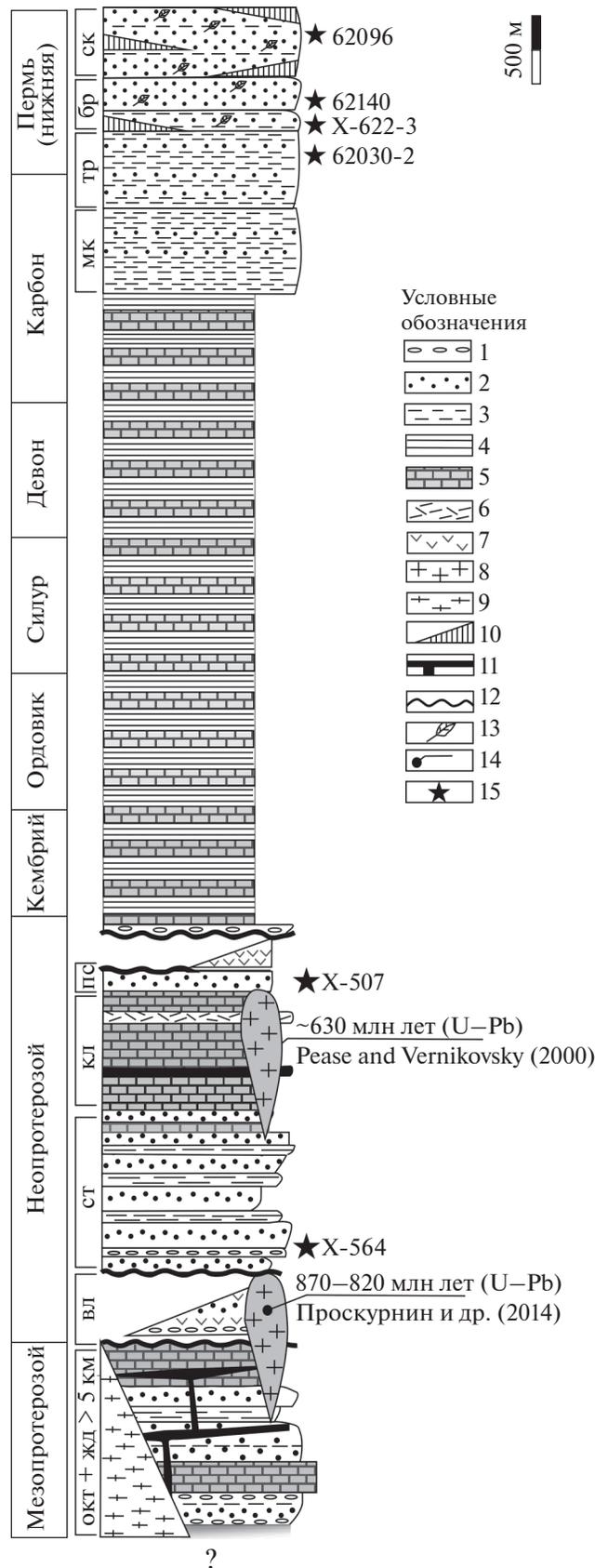
бирского континента и завершивший свое формирование в эдиакарское (поздневендское) время (Priyatkina et al., 2017). В пределах этой зоны нами были изучены неопротерозойские становская и посадочнинская свиты (рис. 2).

Становская свита с резким угловым несогласием перекрывает мезопротерозойские карбонатно-терригенные октябрьскую и ждановскую толщи, но чаще граничит с более древними комплексами по зонам разломов, реже залегает на неопротерозойские отложения.

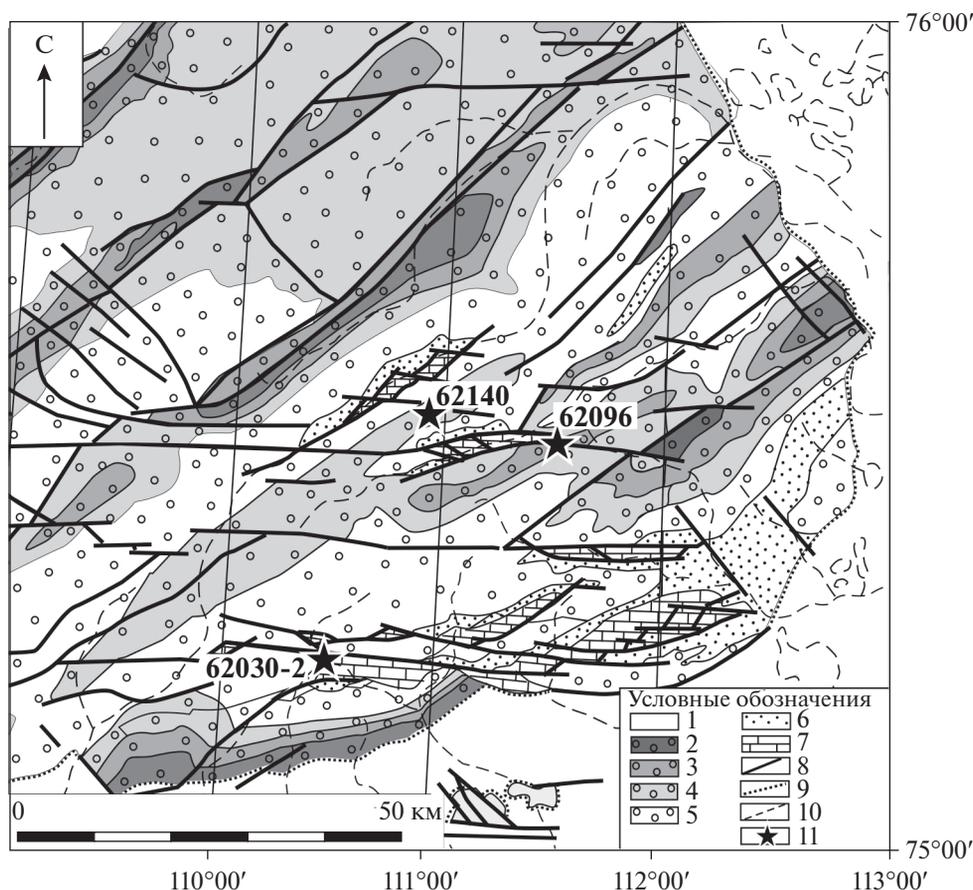
зойских вулканогенных толщах (рис. 2, 3) (Государственная..., 2009, 2013, 2015; Khudoley et al., 2018). Становская свита прослеживается узкой прерывистой полосой вдоль всей Центрально-Таймырской зоны и достигает мощности 1200–1500 м в восточной части региона. Нижняя часть разреза свиты сложена преимущественно зеленовато-серыми песчаниками и сланцами с редкими горизонтами конгломератов. Верхняя часть разреза свиты сложена красноцветными косослоистыми песчаниками и, в меньшей степени, пестроцветными алевролитами и алевро-аргиллитами. Осадконакопление происходило в прибрежно-морских и флювиальных обстановках не ранее чем  $763 \pm 22$  млн лет назад, о чем свидетельствует средний возраст трех наиболее молодых зерен циркона из песчаников становской свиты (Priyatkina et al., 2017). Красноцветные песчаники согласно перекрыты толщей известняков и доломитов колосовской свиты с пачкой базальтов и туфов в средней части разреза, общей мощностью до 2–2.5 км (Государственная..., 2015).

Выше карбонатной толщи несогласно залегают терригенные породы, условно относимые нами к посадочнинской свите (рис. 3). Посадочнинская свита, в свою очередь, несогласно перекрыта терригенным комплексом раннекембрийского возраста. Посадочнинская свита имеет локальное распространение, и ее мощность изменяется от 200 до 500–600 м (Государственная..., 2015). Свита сложена грубообломочными терригенными породами от песчаников до конгломератов и литологически во многом сходна со становской свитой. Возраст посадочнинской свиты по положению в разрезе определяется как поздний неопротерозой (рис. 3).

После формирования в Южно-Таймырской зоне карбонатно-сланцевых отложений венданского карбона, с конца раннего карбона начинается накопление мощного терригенного комплекса, продолжавшееся до мела включительно. Нами была изучена его нижняя часть, представленная макаровской свитой среднего карбона, турузов-



**Рис. 3.** Положение отобранных проб на литологостратиграфической колонке неопротерозоя–нижней перми зон Центрального и Южного Таймыра (Государственная..., 2009, 2015 и данные авторов). Сокращения: окт + жд – октябрьская и ждановская толщи, свиты: вл – верхнеленинградская, ст – становская, кл – колосовская, пс – посадочнинская, mk – макаровская, тр – турузовская, бр – бырангская, ск – соколинская. Условные обозначения: 1 – конгломераты, 2 – песчаники, 3 – алевролиты, 4 – граптолитовые сланцы, 5 – известняки и доломиты, 6 – вулканические породы кислого состава, 7 – вулканические породы среднего состава, 8 – граниты, 9 – гнейсы, 10 – прослои угля, 11 – дайки и силлы основного состава, 12 – несогласие, 13 – флора, 14 – изотопные датировки, 15 – места отбора проб на обломочные цирконы.



**Рис. 4.** Упрощенная геологическая карта района исследований на юго-восточном Таймыре (Государственная..., 1998, с изменениями авторов).

1 — мезозойские отложения; 2 — верхняя пермь; 3 — соколиная свита нижней перми; 4 — быррангская свита нижней перми; 5 — турузовская свита среднего карбона—нижней перми; 6 — макаровская свита среднего карбона; 7 — девонские и нижнекаменноугольные карбонатные отложения; 8 — разломы; 9 — несогласное залегание; 10 — реки; 11 — точки отбора проб для геохронологического исследования.

ской свитой среднего карбона—нижней перми, быррангской и соколиной свитами нижней перми. Суммарная (общая) мощность изученной стратиграфической последовательности составляет около 3.5–4.0 км (рис. 3) (Государственная..., 2009, 2015). Терригенный комплекс без видимого углового несогласия залегает на карбонатных отложениях раннекаменноугольного возраста (рис. 4). Макаровская свита состоит преимущественно из аргиллитов, алевролитов, мелкозернистых песчаников. Мощность макаровской свиты достигает 1000–1100 м. Турузовская свита сложена алевролитами и аргиллитами, отличительной чертой которых является присутствие известковистых конкреций, а также тонкая вкрапленность и стяжения сульфидов; мощность до 1100–1200 м (Государственная..., 2009, 2015). Быррангская свита имеет среднюю мощность 600–1100 м, залегает согласно на турузовской свите (Государственная..., 2009). Нижняя часть разреза свиты включает переслаивающиеся песчаники, алевролиты, аргиллиты и угли, а в средней и верхней частях ее разреза пре-

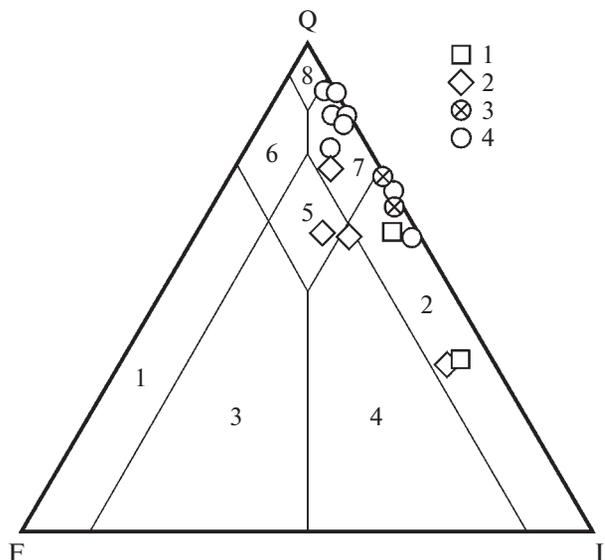
обладают песчаники. Для вышележащей соколиной свиты характерно преобладание песчаников с многочисленными углистыми прослоями, растительными остатками и сидеритовыми конкрециями. Ее средняя мощность составляет около 1000 м (рис. 3). Отложения среднего карбона—нижней перми накапливались в обстановках от открытого относительно глубокого шельфа до прибрежно-морских и лагунных, причем вверх по разрезу обстановки осадконакопления становятся все более мелководными.

#### ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕСЧАНИКОВ

Для количественной оценки состава обломочной фракции песчаников были отобраны 16 представительных образцов песчаников — 8 из становской свиты, 2 из посадочнинской свиты, 4 из турузовской свиты, 2 из нерасчлененных отложений быррангской и соколиной свит. Подсчет содержания кварца, полевых шпатов и обломков пород

(ДМ\_табл. 2) осуществлен классическим точечным (point-counting) методом и проиллюстрирован классификационной диаграммой (McBride, 1963), в основу которой положено соотношение кварца, полевых шпатов и обломков пород (рис. 5). Фигуративные точки составов неопротерозойских песчаников расположены в полях литаренитов и сублитаренитов, распадаясь на 2 группы. Первая группа содержит песчаники только становской свиты, фигуративные точки составов которых находятся в поле сублитаренитов, большей частью вблизи границы с полем кварцевых аренитов. Это наиболее зрелые песчаники, практически полностью состоящие из зерен кварца, нередко хорошо окатанных, а также незначительного количества зерен полевого шпата и обломков пород: кварцитов и кварц-сланцев, а также субвулканических пород. Для этих песчаников характерно развитие регенерационно-кварцевых структур, растворение и бластез кварца в пределах зерна, образование шиповидных структур из серицита на контактах зерен, что говорит о существенном влиянии катагенетических процессов. В образцах из верхней части свиты появляется кальцит, как в виде базального цемента, так и в виде примазок. Во вторую группу входят 2 образца из становской свиты и 2 образца из посадочнинской свиты. Фигуративные точки составов этих образцов располагаются в поле сублитаренитов, но по минеральному составу и структурно-текстурным особенностям близки к песчаникам становской свиты из первой группы: это также довольно зрелые породы с высоким содержанием кварца и довольно высокой степенью катагенетических изменений. Однако в песчаниках посадочнинской свиты обломки пород более разнообразны и включают карбонаты, субвулканические породы, кварциты, кварц-сланцевые сланцы, и появляется базальный кальцит-серицит-хлорит-гидрослюдистый цемент.

Все изученные песчаники позднепалеозойского возраста в целом близки друг к другу по составу и структурно-текстурным особенностям. Они характеризуются присутствием большого количества полевых шпатов и обломков пород, в особенности основных вулканитов, вулканических стекол, зеленокаменно-измененных вулканитов и субвулканических пород, кварц-сланцевых сланцев, кварцитов, кремнистых пород и гранитов. Как и состав, текстура пород свидетельствует о незрелости песчаников: минеральные зерна и обломки угловатые, отмечается присутствие цемента серицит-кальцит-хлорит-лимонитового состава. На классификационной диаграмме (рис. 5) фигуративные точки составов песчаников турузовской свиты попадают в поля литаренитов и лититовых субаркозов, а фигуративные точки песчаников быррангской и соколинской свиты — в поля литаренитов и полевошпатовых литаренитов.



**Рис. 5.** Классификация песчаных разновидностей неопротерозойских и верхнепалеозойских отложений (McBride, 1963).

Состав обломочной фракции: Q — кварц, F — полевые шпаты, L — породы. Поля составов: 1 — аркозы, 2 — литарениты, 3 — лититовые аркозы, 4 — полевошпатовые литарениты, 5 — лититовые субаркозы, 6 — субаркозы, 7 — сублитарениты, 8 — кварцевые арениты. Условные обозначения: 1 — быррангская и соколинская свиты, 2 — турузовская свита, 3 — посадочнинская свита, 4 — становская свита.

## АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДИКИ

Аналитические определения содержаний петрогенных оксидов и элементов-примесей в породах были выполнены в Центральной лаборатории ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург). Определение содержаний оксидов проведено методом рентгенофлуоресцентного анализа с пределами обнаружения не более 0.05%. Содержания Co, Cr, Ni, V и Ba определены методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой, а содержания редкоземельных элементов, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Sc, Hf, Ta, Th и U — методом масс-спектропии с индуктивно-связанной плазмой. Пределы обнаружения Co, Cr, Ni, V составили не более 1 мг/г, Ba, Rb, Sr, Nb, Y, Zr, Hf, Ta, Th и U — не более 0.1–0.5 мкг/г, Sc и редкоземельных элементов не более 0.01 мкг/г. Химический состав изучался в 37 пробах, из них 11 проб из разреза верхнего палеозоя (7 из песчаников и 4 из аргиллитов) и 26 проб из разреза неопротерозоя (18 из песчаников и 8 из аргиллитов). Данные аналитических исследований приведены в ДМ\_табл. 3.

Зерна циркона из большинства проб были изучены с использованием масс-спектрометра Agilent 7700 методом лазерной абляции с индуктивно-связанной плазмой (LA-ICP-MS) в лаборатории Университета Ньюкасла, Австралия. Дополни-

ные анализы (пробы X-564 и X-507) выполнены на ионном микрозонде SHRIMP-II в лаборатории ВСЕГЕИ в Санкт-Петербурге. Для выбора точек исследования использовались оптические (в проходящем и отраженном свете) и катодоллюминесцентные изображения, отражающие внутреннюю структуру и зональность зерен циркона.

LA-ICP-MS U–Pb анализы зерен циркона в Университете Ньюкасла (Австралия) были выполнены с использованием лазерной установки NWR UP-213 Nd:YAG. Анализ проводили в течение 50 с после 30 с измерений фона. Диаметр области абляции составил 40 мкм. Калибровку измерений производили с использованием стандарта GJ-1 с возрастом по  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$   $608.5 \pm 0.4$  млн лет (Jackson et al., 2004). Контроль качества данных осуществляли путем анализа дополнительных стандартов Mudtank и 91500, для которых были получены возрасты с ошибкой ( $2\sigma$ ) в пределах 1% от значений, полученных методом изотопного разбавления TIMS (Black, Gulson, 1978; Wiedenbeck et al., 1995). Погрешности единичных анализов (отношений и оценок возрастов) приводятся на уровне  $2\sigma$ . Анализы с ошибками более 5% были исключены, так как они, скорее всего, отражают гетерогенный изотопный состав изучаемой области зерна.

Измерения U–Pb отношений на SHRIMP-II в лаборатории ВСЕГЕИ проводили по методике, описанной в (Williams, 1998). Интенсивность первичного пучка молекулярных отрицательно заряженных ионов кислорода составляла 4 нА, диаметр области абляции составлял 18 мкм. Обработку полученных данных осуществляли с использованием программы SQUID (Ludwig, 2000). U–Pb отношения нормализованы на значение 0.0668 для отношения  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ , приписанное стандартному циркону TEMORA с возрастом 416.75 млн лет (Black et al., 2003). Погрешности единичных анализов (отношений и оценок возрастов) приводятся на уровне  $1\sigma$ .

Оценка возраста была произведена по отношению  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  для зерен моложе 1000 млн лет и по отношению  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  для зерен древнее 1000 млн лет. Результаты U–Pb изотопного исследования пяти проб неопротерозойских и верхнепалеозойских песчаников представлены в ДМ\_табл. 4 и на рис. 10. Для интерпретации были использованы оценки возрастов со степенью дискордантности менее 10%; величины ошибки для всех анализов составляют не более 5%, а в большинстве случаев не более 2%. Построение графиков с конкордией проводилось с использованием программы ISOPLOT/EX v. 4.15. На рис. 10 для каждой из проб представлены кривые плотности вероятности (КПВ) слева и положение отфильтрованных аналитических данных на конкордии справа.

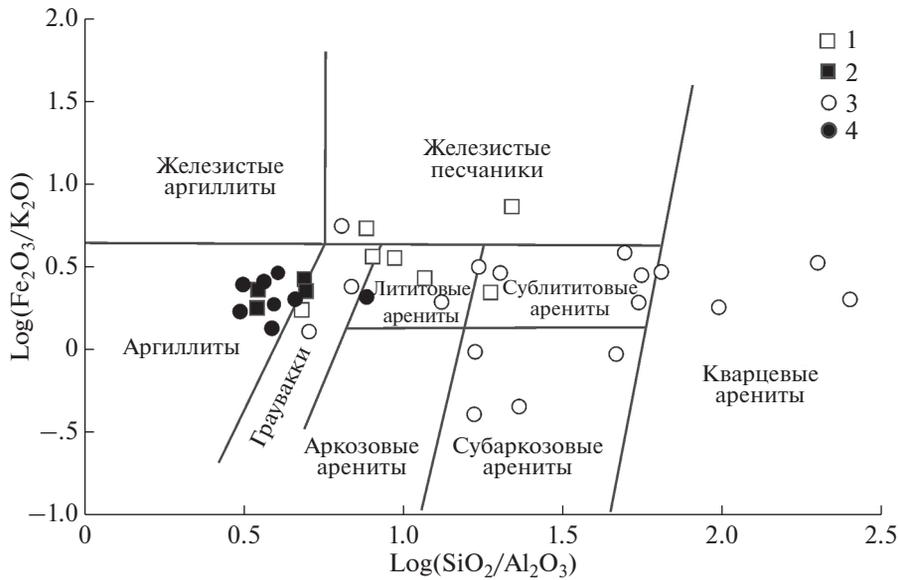
## ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД

### *Петрогенные оксиды*

Неопротерозойские и верхнепалеозойские песчаники характеризуются значительными вариациями содержания  $\text{SiO}_2$  (ДМ\_табл. 3). Если исключить две пробы (X-622-1 и X-521-1) с высокими значениями потерь при прокаливании (18.1 и 14.7 мас. % соответственно), то остальные 22 пробы можно разбить по содержаниям  $\text{SiO}_2$  на три группы. К первой группе относятся песчаники с содержанием  $\text{SiO}_2$  от 68 до 78 мас. %, ко второй — с содержанием  $\text{SiO}_2$  от 84 до 90 мас. % и к третьей — с содержанием  $\text{SiO}_2$  от 93 до 99 мас. %. Первые две группы представлены 6 пробами, и в них в равной степени присутствуют как верхнепалеозойские, так и неопротерозойские песчаники. Третья группа, представленная пробами с наибольшим содержанием  $\text{SiO}_2$ , содержит только неопротерозойские песчаники. В отличие от песчаников, все аргиллиты, за исключением двух проб, характеризуются близкими содержаниями  $\text{SiO}_2$ , варьирующими от 58 до 68 мас. %.

Песчаникам с высоким содержанием  $\text{SiO}_2$  свойственны очень низкие содержания  $\text{Na}_2\text{O}$ , и в 13 из 24 проб они ниже порога обнаружения. Это исключает возможность использования широко распространенной классификационной диаграммы, основанной на соотношениях  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ . Наиболее подходящей оказалась классификационная диаграмма (Herron, 1988), основанная на отношениях  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  (рис. 6). По величине алюмокремниевое модуля ( $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ ) выделяются две группы песчаников: величина более 1.5 фиксируется только в неопротерозойских песчаниках, а менее 1.5 отмечается как в неопротерозойских, так и в верхнепалеозойских песчаниках. К субаркозовым и кварцевым аренитам относятся только неопротерозойские песчаники, а в поле сублититовых аренитов присутствуют 4 пробы неопротерозойских и 1 проба верхнепалеозойских песчаников. В поле лититовых аренитов преобладают верхнепалеозойские песчаники. Три пробы (две неопротерозойских песчаников и одна верхнепалеозойских песчаников) попали в поле граувакк, что отражает, вероятно, значительный объем цемента. За исключением одной пробы, все аргиллиты, как неопротерозойские, так и верхнепалеозойские, занимают очень узкое поле с близкими значениями отношений  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Низкие концентрации щелочей, в первую очередь  $\text{Na}_2\text{O}$ , не позволяют корректно рассчитать индекс химического выветривания (CIA), и более показательным критерием степени выветривания породы оказывается гидролизатный модуль  $((\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3)/\text{SiO}_2)$  (Юдович,



**Рис. 6.** Классификационная диаграмма (Herron, 1988) для терригенных пород неопротерозоя и верхнего палеозоя восточного Таймыра.  
1 – песчаники, верхний палеозой; 2 – аргиллиты, верхний палеозой; 3 – песчаники, неопротерозой; 4 – аргиллиты, неопротерозой.

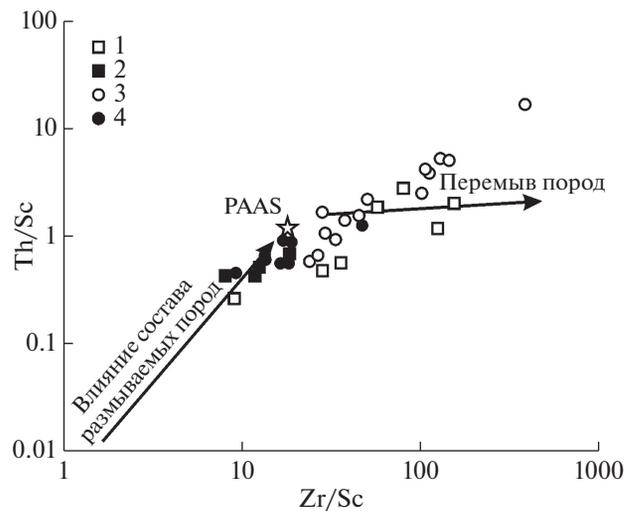
Кетрис, 2000). В верхнепалеозойских песчаниках величина этого модуля варьирует от 0.1 до 0.4, тогда как в большинстве неопротерозойских пород она составляет менее 0.1, указывая на их заметно большую зрелость в сравнении с верхнепалеозойскими песчаниками.

*Элементы-примеси*

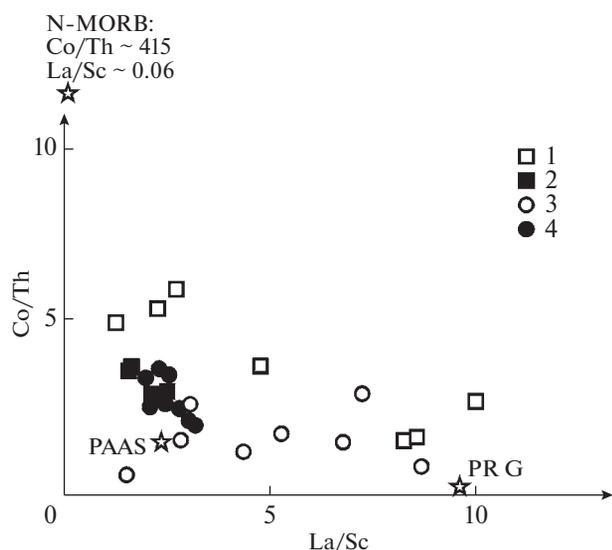
В отличие от петрогенных оксидов, элементы-примеси значительно более устойчивы в осадочных процессах и дают более полную информацию о составе пород в источнике сноса обломочного материала (Тейлор, Мак-Леннан, 1988; Condie, 1993; McLennan et al., 1993, 2003).

Для оценки влияния выветривания и переноса обломочного материала на его состав обычно используется диаграмма Th/Sc–Zr/Sc. Величина отношения Th/Sc чувствительна к составу пород, в основных породах она обычно не превышает 0.1, а в кислых близка к 0.8–1. Последнее значение Th/Sc отношения характерно для постархейского австралийского сланца (PAAS), состав которого близок к среднему составу верхней континентальной коры (McLennan et al., 1993, 2003). Величина отношения Zr/Sc более 20 указывает на обогащение цирконом, что, учитывая его устойчивость к физическому выветриванию, происходит при неоднократном перемыве пород. Как видно из рис. 7, в поле влияния состава размываемых пород располагаются только аргиллиты, причем величина отношения Th/Sc в них варьирует от 0.42 до 1.26, что характерно для терриген-

ных отложений, сформировавшихся за счет эрозии горных пород кислого и среднего состава. Фигуративные точки составов песчаников располагаются вдоль тренда переотложения, и в них величина отношения Zr/Sc варьирует от 24 до 355. Наиболее низкое отношение Zr/Sc = 9.0 было по-



**Рис. 7.** Диаграмма соотношения Th/Sc и Zr/Sc в терригенных породах неопротерозоя и верхнего палеозоя восточного Таймыра, показывающая влияние осадочных процессов на химический состав терригенных пород (McLennan et al., 1993, 2003).  
1 – песчаники, верхний палеозой; 2 – аргиллиты, верхний палеозой; 3 – песчаники, неопротерозой; 4 – аргиллиты, неопротерозой. PAAS – постархейский австралийский сланец (Тейлор, Мак-Леннан, 1988).



**Рис. 8.** Диаграмма соотношения  $Co/Th$  и  $La/Sc$  в терригенных породах неопротерозоя и верхнего палеозоя восточного Таймыра, позволяющая реконструировать состав пород в источнике сноса.

Для сравнения на диаграмму вынесены усредненные составы протерозойского гранита PR G (Condie, 1993), постаршейского австралийского сланца PAAS (Тейлор, Мак-Леннан, 1988), базальта срединно-океанического хребта N-MORB (Sun, McDonough, 1989). Условные обозначения: 1 – песчаники, верхний палеозой; 2 – аргиллиты, верхний палеозой; 3 – песчаники, неопротерозой; 4 – аргиллиты, неопротерозой.

лучено для пробы песчаника с аномально высокими потерями при прокаливании (18.1%), которая, соответственно, не может рассматриваться как представительная. В пробах с наиболее высокими содержаниями  $SiO_2$  концентрации Sc оказались ниже порога обнаружения, и они не были вынесены на диаграмму.

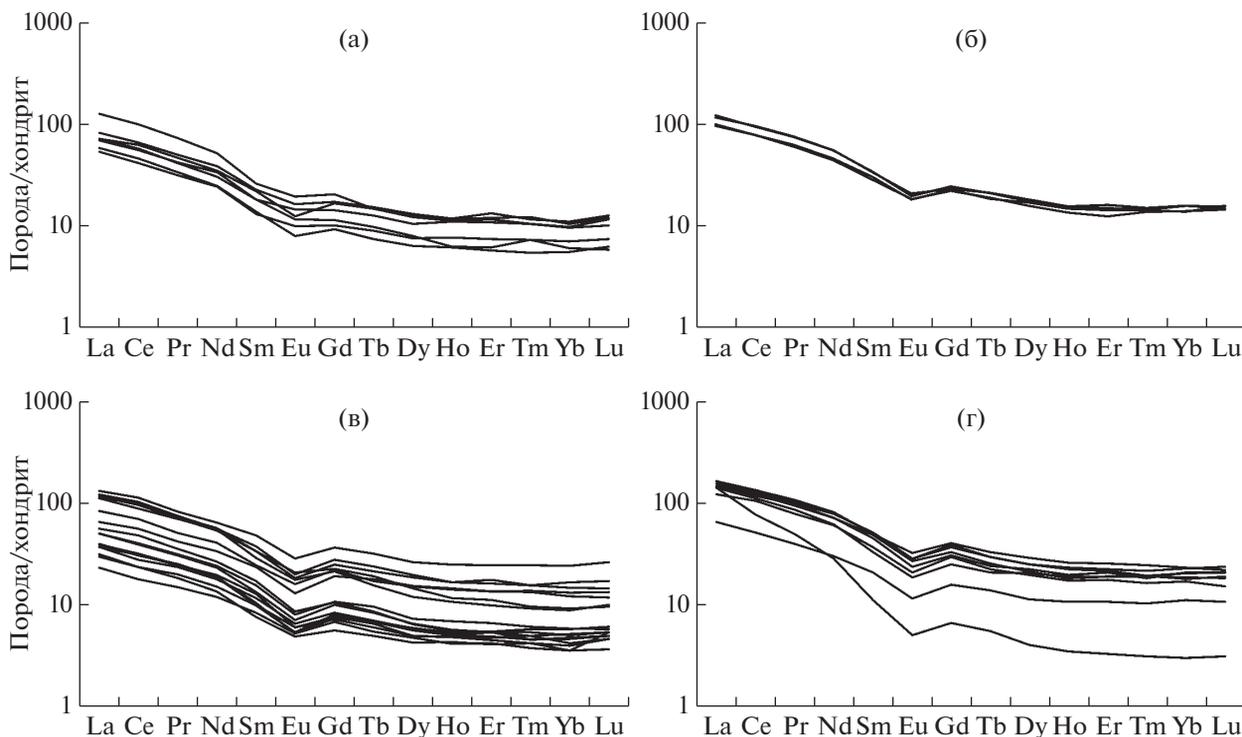
Низкие содержания Cr (от 4 до 137 мкг/г), как и низкие величины Cr/V отношения (за исключением одной пробы, где значение этого отношения около 2.5), указывают на то, что продукты размыва ультраосновных пород не играли существенной роли в формировании изученных обломочных толщ. В то же время значительное влияние осадочных процессов на состав обломочных пород заставляет с осторожностью относиться к возможности использования других диаграмм для реконструкции источников сноса. Так, на диаграмму  $Co/Th-La/Sc$  (рис. 8) не были вынесены фигуративные точки 8 анализов неопротерозойских песчаников – в 3 из них содержания Sc оказались ниже порога обнаружения, а в 5 других величина  $La/Sc$  отношения варьирует от 14 до 111 и превышает типичные значения в большинстве магматических пород. В большинстве этих проб содержание  $SiO_2$  превышает 90 мас. %, также указывая на значительную роль неоднократного пе-

реотложения обломочного материала. Остальные песчаники и аргиллиты группируются около состава PAAS со слабым смещением в сторону продуктов разрушения основных пород или занимают поле между PAAS и средним составом гранитов, указывая на то, что в их источнике сноса преобладали породы кислого и среднего состава.

Наименее подвержены влиянию осадочных процессов редкоземельные элементы (McLennan et al., 1993, 2003). Для изученных проб данная закономерность также характерна. Хотя суммарное содержание редкоземельных элементов, варьирующее от 30 до 214 мкг/г, обратно пропорционально содержанию  $SiO_2$ , основные отношения, характеризующие их распределение, изменяются в целом незначительно, что хорошо видно на рис. 9. Так, нормализованное по хондриту отношение  $(La/Sm)_n$  в песчаниках варьирует от 3.3 до 4.9, со средним значением 3.5, а  $(La/Lu)_n$  отношение – от 6.3 до 11.0, со средним значением 8.0. В аргиллитах, за исключением одной пробы,  $(La/Sm)_n$  отношение варьирует от 3.0 до 4.3, со средним значением 3.4, а  $(La/Lu)_n$  отношение – от 6.1 до 8.1, со средним значением 7.3. Величина европейской аномалии также варьирует слабо. Ее средние значения в песчаниках составляют 0.70, а в аргиллитах 0.67. Средние величины отношений редкоземельных элементов несколько меньше таковых в PAAS, где  $(La/Sm)_n = 4.4$  и  $(La/Lu)_n = 13.6$ , тогда как величина европейской аномалии, равная 0.66 (McLennan et al., 2003), очень близка к наблюдаемой в изученных пробах. Полученные величины отношений  $(La/Sm)_n$  и  $(La/Lu)_n$  указывают на более пологое, чем у PAAS, распределение редкоземельных элементов. Учитывая, что состав PAAS близок к среднему составу верхней коры (Тейлор, Мак-Леннан, 1988), более пологое распределение редкоземельных элементов позволяет предполагать, что усредненный состав источника сноса обломочного материала был несколько более основным, чем средний состав верхней коры.

## РЕЗУЛЬТАТЫ U–Pb ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБЛОМОЧНОГО ЦИРКОНА

В пробе X-564 песчаников становской свиты было изучено 28 зерен циркона, при этом оценки возрастов 20 из них характеризуются степенью дискордантности менее 10%. Наиболее распространены зерна неопротерозойского (45%) и палеопротерозойского (40%) возрастов (рис. 10). Неопротерозойская популяция циркона представлена зернами с возрастными 950–780 млн лет, причем наибольшая их часть имеет возрасты около 800 млн лет. Палеопротерозойская популяция циркона включает несколько зерен с возрастными ~1775–1700 млн лет, а также отдельные зерна с



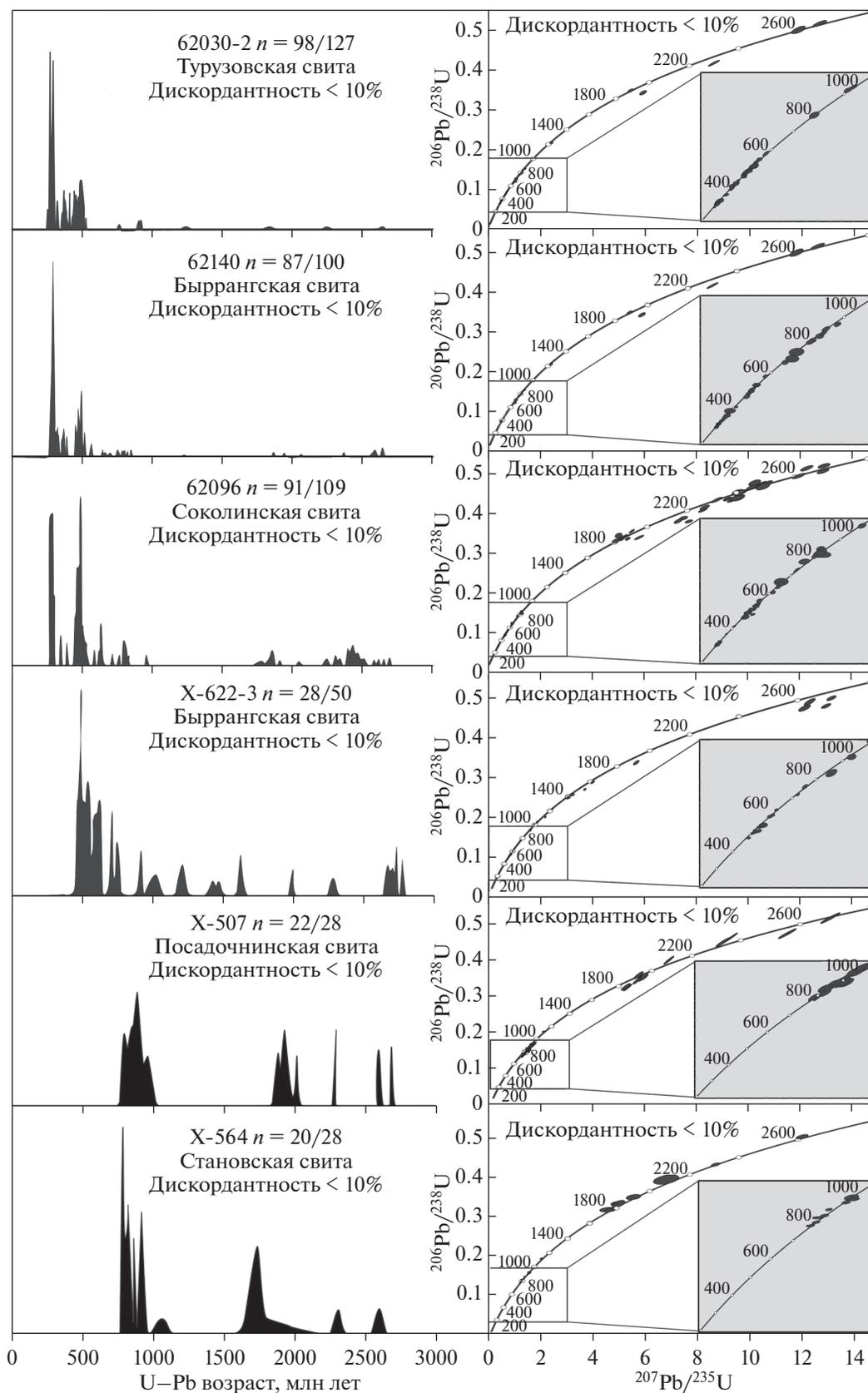
**Рис. 9.** Нормированные к хондриту (Sun, McDonough, 1989) содержания редкоземельных элементов в терригенных породах неопротерозоя и верхнего палеозоя восточного Таймыра. (а) – песчаники, верхний палеозой; (б) – аргиллиты, верхний палеозой; (в) – песчаники, неопротерозой, (г) – аргиллиты, неопротерозой.

возрастами в интервале 2300–1800 млн лет. Кроме того, в пробе были отмечены одно мезопротерозойское зерно с возрастом  $1061 \pm 37$  млн лет и одно архейское зерно с возрастом  $2595 \pm 21$  млн лет. Возраст самого молодого зерна, обнаруженного в пробе, составляет  $779 \pm 5$  млн лет.

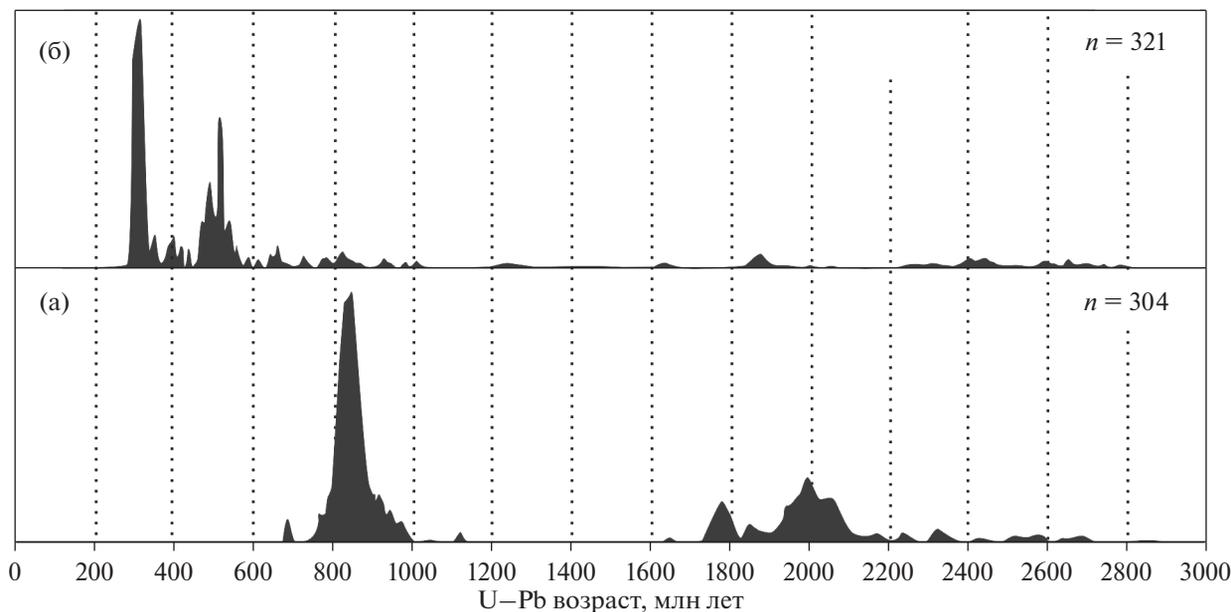
В пробе песчаников посадочнинской свиты X-507 также было изучено 28 зерен циркона, из которых 22 характеризуются U–Pb возрастaми со степенью дискордантности менее 10%. В изученной пробе распространены зерна циркона, сходные по возрасту с таковыми из песчаников становской свиты: для них установлены неопротерозойский (59%), палеопротерозойский (32%) и архейский (9%) возраста (рис. 10). Неопротерозойская популяция представлена зернами с возрастaми 1000–800 млн лет, что обуславливает максимум около 870 млн лет на КПВ. Как и в песчаниках становской свиты, встречаются зерна с возрастaми в интервале 2300–1800 млн лет. Возраст самого молодого зерна, обнаруженного в пробе, составляет  $805 \pm 14$  млн лет.

Результаты исследования песчаников турузовской, буррангской и соколинской свит позднепалеозойского возраста показали два принципиально отличных типа КПВ: (1) по пробам 62096, 62140, 62030-2 и (2) по пробе X-622-3. В пробах

62096, 62140, 62030-2 было изучено 100 и более зерен, из которых 75% и более характеризуются степенью дискордантности менее 10%. Доминируют зерна позднепалеозойского возраста с соответствующим максимумом около 300 млн лет на КПВ. Вторая по распространенности группа зерен в этих пробах имеет раннепалеозойский возраст. В пробе 62096 содержание зерен с возрастaми в интервале 550–470 млн лет достигает 32%, что отмечается по максимуму около 500 млн лет на КПВ (рис. 10). В пробах 62140 и 62030-2 содержание зерен циркона с раннепалеозойскими возрастaми (в интервале 550–470 млн лет) существенно ниже (менее 10%), однако на КПВ данных проб также присутствуют небольшие пики на отметке 500 млн лет. В подчиненном количестве во всех трех пробах обнаруживаются зерна неопротерозойского, палеопротерозойского и архейского возрастa. Наиболее существенна популяция древних зерен циркона в пробе 62096, где количество зерен неопротерозойского возраста составляет 15%, а суммарное количество палеопротерозойских и архейских зерен около 30%. В неопротерозойской популяции циркона преобладают зерна с возрастaми около 800 и 600 млн лет, в палеопротерозойской – с возрастaми около 1850 млн лет, в архейской – с возрастaми в интервале 2700–2400 млн лет. Это характерно и для древних зерен циркона



**Рис. 10.** Кривые плотности вероятности возрастов зерен обломочного циркона (слева) и диаграммы с конкордией (справа) для изученных проб неопротерозойских и верхнепалеозойских песчаников восточного Таймыра.  $n$  – число учетных анализов при фильтре по степени дискордантности  $\pm 10\%$ /общее число зерен.



**Рис. 11.** Сводные кривые плотности вероятности возрастов зерен обломочного циркона (а) в пробах 62096, 62140, 62030-2, X-622-3 из верхнепалеозойских песчаников, (б) в пробах становской и посадочнинской свит неопротерозоя: X-507 и X-564 (настоящее исследование), X-733, 82102, kam-2 (Priyatkina et al., 2017). *n* – число учтенных анализов при фильтре по степени дискордантности ± 10%.

в пробах 62140 и 62030-2. В пробе 62096 также отмечается несколько зерен с возрастaми в диапазоне 2400–2200 млн лет, однако на рис. 10 видно, что оценки возрастaов этих зерен характеризуются значительной степенью дискордантности, и, следовательно, велика вероятность того, что эти возрастaы не отражают реальных геологических событий. В пробе 62030-2 возраст самого молодого зерна составляет  $275 \pm 5$  млн лет, в пробе 62140 –  $290 \pm 5$  млн лет, а в пробе 62096 –  $297 \pm 4$  млн лет, что не противоречит установленному по палеонтологическим находкам раннепермскому возрастaу толщ, из которых были отобраны изученные пробы песчаников.

В пробе X-622-3 проанализировано 50 зерен, но только по 28 зернам получены оценки возрастaа со степенью дискордантности менее 10%. По распределению возрастaов зерен обломочного циркона проба X-622-3 несколько отличается от других проб песчаников позднепалеозойского возрастaа. Так, в пробе X-622-3 было обнаружено только одно зерно позднепалеозойского возрастaа ( $320 \pm 8$  млн лет), столь характерного для зерен циркона из остальных проб. Доля зерен, возрастaы которых попадают в интервал 470–550 млн лет, составляет 30% от общего количества датированных зерен. Второй по значимости в пробе является группа зерен, равномерно распределенная по мезопротерозойскому отрезку КПВ (28%). Также в изученной пробе присутствуют несколько зерен неопротерозойского, палеопротерозойского и архейского возрастaов, однако их количество не позволяет выделить отдельные возрастaные группы.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрение петрографических, геохимических и геохронологических характеристик двух основных терригенных комплексов, входящих в состав Таймырского складчато-надвигового пояса, позволяет сделать важные выводы об истории тектонического развития данной территории. Изученные в настоящей работе отложения представлены двумя основными возрастными группами: неопротерозойской и позднепалеозойской.

Мезо- и неопротерозойский интервал сводной КПВ по пробам становской и посадочнинской свит (рис. 11а) хорошо согласуется с геохронологическими данными о мезо- и неопротерозойском магматизме в пределах Центрально-Таймырской зоны, в основном связанном с этапом 970–800 млн лет. К нему относятся островодужная формация Озера Трех Сестер, включающая плагиограниты с возрастaами  $\sim 967 \pm 17$  и  $966 \pm 5$  млн лет (Верниковский и др., 2011), Снежинский и Ждановский комплексы гранитоидов S- и I-типов с возрастaом 870–820 млн лет, а также их вулканические аналоги, представленные дацитами и риолитами верхнеленинградской свиты (Верниковский и др., 1998; Pease, Vernikovskiy, 2000; Кузьмин и др., 2007; Проскурнин и др., 2014). Таким образом, накоплению становской свиты предшествовало крупное аккреционное событие на протерозойской окраине Сибирской платформы, а сформировавшиеся в ходе него магматические комплексы послужили источником терригенного материала для молассовых отложений, типичным примером

которых является становская свита. Представленные характеристики пород становской свиты свидетельствуют об их формировании в крупном бассейне седиментации, соответствующем передовому прогибу, где субконтинентальные условия способствовали накоплению аллювиальных и мелководно-морских отложений — продуктов размыва растущего складчато-надвигового сооружения. Между тем петрографические и геохимические характеристики указывают на то, что не менее половины песчаников становской свиты не являются непосредственно продуктами размыва магматических и метаморфических комплексов, а могли сформироваться за счет размыва более древних песчаников. Наиболее вероятным кандидатом являются песчаники мезопротерозойской октябрьской толщи, служившие поставщиком обломочного циркона палеопротерозойского и архейского возрастов.

Терригенные отложения позднепалеозойского возраста были детально рассмотрены в работах (Zhang et al., 2013, 2015). Согласно ранее опубликованным петрографическим и минералогическим данным и результатам настоящего исследования, породы турузовской, быррангской и соколинской свит представлены литаренитами и полевошпатовыми литаренитами, включающими значительное количество обломков осадочных, магматических и метаморфических пород. Незрелый состав песчаников и их геохимические характеристики указывают на то, что осадконакопление происходило на незначительном удалении от источников сноса, в состав которых входили как метаморфические и магматические породы кислого и среднего состава, так и, в меньшей степени, породы основного состава. Размыв более древних терригенных пород также имел место, но в заметно меньшей степени, чем при накоплении неопротерозойских песчаников.

Полученные на основе датирования обломочного циркона КПВ для проб из турузовской, быррангской и соколинской свит соответствуют таковым для проб из разновозрастных отложений, ранее отобранных в восточной части Южно-Таймырской зоны (Zhang et al., 2013). Основной чертой КПВ проб 62096, 62140, 62036-2 (рис. 10) является наличие доминирующей популяции зерен циркона с возрастными ~330–270 млн лет и пиком на отрезке КПВ около 300 млн лет, близким к возрасту осадконакопления. Коллизионные граниты с возрастными 340–275 млн лет распространены внутри северной тектонической зоны Таймырского складчатого пояса (Верниковский и др., 1995; Государственная..., 2013; Курапов и др., 2018), и именно они могли являться основным источником сноса кластического материала для терригенного комплекса позднепалеозойского возраста. Другим источником сноса мог являться Уральский ороген, где

в это же время происходили интенсивные коллизионные события (Кузнецов, Романюк, 2014).

Несмотря на малое количество изученных зерен в пробе X-622-3, очевидно, что возрастные популяции циркона здесь отличаются от обнаруженных в трех вышеупомянутых пробах. Самая молодая популяция циркона здесь имеет возраст около ~500 млн лет. При этом распространены зерна неопротерозойского и мезопротерозойского возрастов. Такое распределение возрастов зерен обломочного циркона не имеет аналогов среди разновозрастных толщ ни в Южно-Таймырской зоне и на севере Сибирского кратона, ни на Северной Земле (Ershova et al., 2015, 2016; Zhang et al., 2013). Источником сноса кембрийских и более древних нео- и мезопротерозойских зерен циркона частично могли служить породы Карского блока и Центрально-Таймырской зоны, но сравнительно незрелый состав песчаников и их геохимические характеристики указывают на то, что перемыв более древних терригенных пород этих структур не имел доминирующего значения в накоплении верхнепалеозойских толщ. Другим источником, вероятно, мог являться блок относительно древней континентальной коры, входивший в состав Тиманского орогена, поскольку упомянутые популяции циркона весьма характерны для связанных с ним палеозойских отложений (Kuznetsov et al., 2010; Miller et al., 2010; Beranek et al., 2013; Ershova et al., 2016).

В целом наличие доминирующих пиков на отрезках КПВ ~500 и ~300 млн лет является характерной геохронологической меткой северной части Урала и соседних регионов (например, Кузнецов и др., 2012).

Общей чертой как неопротерозойского, так и верхнепалеозойского терригенных комплексов является наличие продуктов перемыва более древних терригенных пород. Хотя в самом этом факте нет ничего необычного, в ряде случаев продукты перемыва оказываются доминирующими, и по петрографическому и химическому составу они становятся близкими к песчаникам, накапливавшимся на платформах (например, Pettijohn et al., 1987; Condie, 1993). При этом возраст наиболее молодых зерен циркона может оказаться как довольно близким к возрасту осадконакопления вмещающей породы (например, пробы X-564, 62096, 62140, 62030-2), так и заметно более древним, оторванным от возраста осадконакопления более чем на 100 млн лет (например, пробы X-507, X-622-3). Наблюдаемая в терригенных комплексах Таймыра картина распределения возрастов зерен обломочного циркона оказывается более сложной, чем рассматриваемая в (Sawood et al., 2012), и указывает на то, что предложенная этими авторами схема распределения возрастов зерен обломочного циркона в песчаниках, накапливав-

шихся в различных тектонических обстановках, должна применяться с осторожностью и сопровождаться дополнительными характеристиками терригенных пород.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Терригенный комплекс осадочных отложений неопротерозойского возраста характеризуется значительной изменчивостью и содержит как относительно незрелые песчаники, так и песчаники, близкие к кварцевым аренитам с содержанием  $\text{SiO}_2$  более 90 мас. %. В составе источника сноса присутствовали как метаморфические и магматические породы среднего и кислого состава, так и терригенные породы, перемыв которых и привел к формированию высокозрелых песчаников. Судя по возрастам зерен обломочного циркона, преимущественно размывались породы Центрально-Таймырской зоны.

2. Терригенный комплекс позднепалеозойского возраста более однороден по петрографическому и геохимическому составу и содержит менее зрелые породы, в обломочной фракции которых присутствуют фрагменты осадочных, метаморфических и магматических пород как кислого, так и, в меньшей степени, основного состава. Продукты перемыва более древних терригенных пород присутствуют, но в значительно меньшей степени, чем в неопротерозойских породах. Судя по возрастам зерен обломочного циркона, источниками сноса могли служить Уральский ороген, тиманиды и, в меньшей степени, Карский блок и Центрально-Таймырская зона.

3. Хотя зерна обломочного циркона и несут важнейшую информацию об источниках сноса обломочного материала, их возрасты могут использоваться для определения тектонической обстановки формирования осадочного бассейна лишь с осторожностью. Примером этому служат верхнепалеозойские песчаники Таймыра, в которых возрасты наиболее молодых зерен циркона в одних случаях оказываются близкими ко времени осадконакопления, а в других отличаются от него более чем на 100 миллионов лет.

**Благодарности.** Образцы 62096, 62140, 62030-2 были предоставлены Д.А. Застрожным (ВСЕГЕИ, Университет Осло). Авторы выражают благодарность А.Б. Котову (ИГГД РАН) за ценные замечания, способствовавшие улучшению содержания статьи.

**Источники финансирования.** Изотопные исследования и их интерпретация выполнены при поддержке Australian Research Council Discovery Project 120104004 (WJ Collins) и проекта РФФИ № 19-05-00521. Петрографические и геохимические исследова-

ния, а также их интерпретация выполнялись при поддержке гранта РФФИ № 17-17-01171.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Верниковский В.А.* Геодинамическая эволюция Таймырской складчатой области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1996.

*Верниковский В.А., Неймарк Л.А., Пономарчук В.А., Верниковская А.Е., Киреев А.Д., Кузьмин Д.С.* Геохимия и возраст коллизионных гранитоидов и метаморфитов Карского микроконтинента (Северный Таймыр) // Геология и геофизика. 1995. Т. 36. № 12. С. 50–64.

*Верниковский В.А., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Ковач В.П., Яковлева С.З.* Докембрийские граниты Фаддеевского террейна (Северный Таймыр): новые геохимические и изотопно-геохронологические (U–Pb, Sm–Nd) данные // Докл. АН. 1998. Т. 363. № 5. С. 653–657.

*Верниковский В.А., Метелкин Д.В., Верниковская А.Е., Сальникова Е.Б., Ковач В.П., Котов А.Б.* Древнейший островодужный комплекс Таймыра: к вопросу формирования Центрально-Таймырского аккреционного пояса и палеогеодинамических реконструкций в Арктике // Докл. АН. 2011. Т. 436. № 5. С. 647–653.

*Верниковский В.А., Добрецов Н.Л., Метелкин Д.В., Матушкин Н.Ю., Кулаков И.Ю.* Проблемы тектоники и тектонической эволюции Арктики // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 8. С. 1083–1107.

Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1000000 (новая серия). Лист S-47-49 – оз. Таймыр (восточная часть). Карта. Ред. Погребницкий Ю.Е. СПб.: ВСЕГЕИ, 1998.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Лист S-48 – оз. Таймыр (восточная часть). Карта и Объяснительная записка. Ред. Проскурнин В.Ф. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2009. 253 с. + 5 вкл.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Лист T-45-48 – мыс Челюскин. Карта и Объяснительная записка. Ред. Макарьев А.А. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2013. 479 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Лист S-47 – оз. Таймыр (западная часть). Карта и Объяснительная записка. Ред. Проскурнин В.Ф. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2015. 424 с. + 11 вкл.

*Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натанов Л.М.* Тектоника литосферных плит территории СССР. Кн. 2. М.: Недра, 1990.

*Кузнецов Н.Б., Соболева А.А., Миллер Е.А., Удортатина О.В., Герелс Дж., Романюк Т.В.* Первые U/Pb-датировки детритных цирконов из песчаников среднего и верхнего палеозоя Полярного Урала: тестирование региональных тектонических моделей // Докл. АН. 2012. Т. 451. № 2. С. 183–188.

*Кузнецов Н.Б., Романюк Т.В.* Палеозойская эволюция Полярного Урала: Войкарский бассейн с корой океанического типа существовал не менее 65 млн лет // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 2014. Т. 89. Вып. 5. С. 56–70.

*Кузьмин В.К., Проскурнин В.Ф., Ларионов А.Н.* О позднеарифейском возрасте гранитоидов снежинского

- комплекса, Северо-Восточный Таймыр, по данным цирконометрии // Записки Российского минералогического общества. 2007. Ч. 136 (1). С. 42–49.
- Курапов М.Ю., Ершова В.Б., Макарьев А.А., Макарьева Е.М., Худoley А.К., Лучицкая М.В., Прокopiev А.В. Новые данные о среднепалеозойской геодинамике Северного Таймыра на основе изотопно-геохимического изучения гранитоидов // Геотектоника. 2018. № 2. С. 76–90.
- Маслов А.В., Мизенс Г.А., Подковыров В.Н., Ножкин А.Д., Сокур Т.М., Малиновский А.И., Сорокин А.А., Смирнова Ю.Н., Гареев Э.З., Дмитриева Н.В., Крупенин М.Т., Летникова Е.Ф. Синорогенные глинистые породы: особенности валового химического состава и палеотектоника // Геохимия. 2015. № 6. С. 512–538.
- Маслов А.В., Подковыров В.Н., Мизенс Г.А., Ножкин А.Д., Фазлашметов А.М., Малиновский А.И., Худoley А.К., Котова Л.Н., Кушцова А.В., Гареев Э.З., Зайнуллин Р.И. Дискриминантные палеогеодинамические диаграммы для терригенных пород: опыт сопоставления // Геохимия. 2016. № 7. С. 579–595.
- Проскурнин В.Ф., Верниковский В.А., Метелкин Д.В., Петрушков Б.С., Верниковская А.Е., Гавриш А.В., Багаева А.А., Ларионов А.Н. Риолит-гранитная ассоциация Центрально-Таймырской зоны: свидетельство аккреционно-коллизонных событий в неопротерозойское время // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 1. С. 23–40.
- Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
- Розен О.М. Сибирский кратон: тектоническое районирование, вопросы эволюции // Геотектоника. 2003. № 3. С. 1–19.
- Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 379 с.
- Уфлянд А.К., Натанов Л.М., Лопатин В.М., Чернов Д.В. О тектонической природе Таймыра // Геотектоника. 1991. № 6. С. 76–93.
- Юдович Э.Я., Кетрис М.П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000.
- Beranek L.P., Van Staal C.R., McClelland W.C., Israel S., Mihalynuk M.G. Baltican crustal provenance for Cambrian–Ordovician sandstones of the Alexander terrane, North American Cordillera: evidence from detrital zircon U–Pb geochronology and Hf isotope geochemistry // J. Geol. Soc. (London). 2013. V. 170. P. 7–18.
- Black L., Gulson B. The age of the Mud Tank carbonatite, Strangways range, Northern Territory // BMR J. Aust. Geol. Geophys. 1978. № 3. P. 227–232.
- Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., Aleinikoff J.N., Davis D.W., Korsch R.J., Foudoulis C. TEMORA 1: a new zircon standard for U–Pb geochronology // Chem. Geol. 2003. V. 200. № 1–2. P. 155–170.
- Cawood P.A., Hawkesworth C.J., Dhuime B. Detrital zircon record and tectonic setting // Geology. 2012. V. 40. P. 875–878.
- Condie K.C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales // Chem. Geol. 1993. V. 104. P. 1–37.
- Dickinson W.R., Beard L.S., Brackenkridge G.R., Erjavec J.L., Ferguson R.C., Inman K.F., Knepp R.A., Lindberg F.A., Ryberg P.T. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting // Geol. Soc. Am. Bull. 1983. V. 94. № 2. P. 222–235.
- Ershova V.B., Prokopiev A.V., Nikishin V.A., Khudoley A.K., Malyshev N.A., Nikishin A.M. New data on Upper Carboniferous–Lower Permian deposits of Bol'shevik Isl. (Severnaya Zemlya Archipelago) // Polar Res. 2015. V. 34. № 24558. <https://doi.org/10.3402/polar.v34.24558>
- Ershova V.B., Prokopiev A.V., Khudoley A.K. Devonian–Permian sedimentary basins and paleogeography of the Eastern Russian Arctic: an overview // Tectonophysics. 2016. V. 691. P. 234–255.
- Gehrels G. Detrital zircon U–Pb geochronology: current methods and new opportunities // Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances. Eds. Busby C., Azor A. Chichester: Blackwell Publishing Ltd, 2012. P. 47–62.
- Gehrels G. Detrital zircon U–Pb geochronology applied to tectonics // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2014. V. 42. P. 127–149.
- Herron M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data // J. Sediment. Res. 1988. V. 58. № 5. P. 820–829.
- 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. № 1–2. P. 47–69.
- Khudoley A.K., Verzhbitsky V.E., Zastrozhnov D.A., O'Sullivan P., Ershova V.B., Proskurnin V.F., Tuchkova M.I., Rogov M.A., Kyser T.K., Malyshev S.V., Schneider G.V. Late Paleozoic–Mesozoic tectonic evolution of the eastern Taimyr–Severnaya Zemlya Fold and Thrust Belt and adjoining Yenisey–Khatanga Depression // J. Geodynamics. 2018. V. 119. P. 221–241.
- Kuznetsov N.B., Natapov L.M., Belousova E.A., O'Reilly S.Y., Griffin W.L. Geochronological, geochemical and isotopic study of detrital zircon suites from late Neoproterozoic clastic strata along the NE margin of the East European Craton: implications for plate tectonic models // Gondwana Res. 2010. V. 17. P. 583–601.
- Ludwig K.R. SQUID 1.00, A User's Manual // Berkeley Geochronology Center. Spec. Publ. 2000. № 2.
- McBride E.F. A classification of common sandstones // J. Sediment. Petrol. 1963. V. 33. P. 664–669.
- McLennan S.M., Hemming S.R., McDaniel D.K., Hanson G.N. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics // Geol. Soc. Am. Spec. Pap. 1993. V. 284. P. 21–40.
- McLennan S.M., Bock B., Hemming S.R., Hurowitz J.A., Lev S.M., McDaniel D.K. The role of provenance and sedimentary processes in the geochemistry of sedimentary rocks // Geochemistry of sediments and sedimentary rocks: evolutionary considerations to mineral deposit-forming environments. Ed. Lentz D. St. John's: Geological Association of Canada, 2003. P. 7–38.
- Miller E.L., Kuznetsov N., Soboleva A., Udoratina O., Grove M.J., Gehrels G. Baltica in the Cordillera? // Geology. 2010. V. 39. P. 791–794.
- Pease V. Eurasian orogens and Arctic tectonics: an overview // Geol. Soc. Mem. London. 2011. V. 35. P. 311–324.
- Pease V., Vernikovskiy V. The tectono-magmatic evolution of the Taimyr Peninsula: further constraints from new ion-microprobe data // Polarforschung. 2000. V. 68. P. 171–178.

*Pettijohn E.J., Potter P.E., Siever R.* Sand and sandstone. New York: Springer, 1987. 553 p.

*Priyatkina N., Collins W.J., Khudoley A.K., Zastrozhnov D., Ershova V., Chamberlain K., Proskurnin V., Shatsillo A.* The Proterozoic evolution of northern Siberian Craton margin: a comparison of U–Pb–Hf signatures from sedimentary units of the Taimyr orogenic belt and the Siberian platform // *Int. Geol. Rev.* 2017. V. 1. P. 1–27.

*Sun S.-S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Magmatism in the Ocean Basins*. Geol. Soc. London. Spec. Publ. 1989. № 42. P. 313–345.

*Vernikovskiy V.A., Vernikovskaya A.E.* Central Taimyr accretionary belt (Arctic Asia): Meso-Neoproterozoic tectonic evolution and Rodinia breakup // *Precambrian Res.* 2001. V. 110. P. 127–141.

*Wiedenbeck M., Alle P., Corfu F., Griffin W.L., Meier M., Oberli F., Quadt A.V., Roddick J.C., Spiegel W.* Three natural

zircon standards for U–Th–Pb, Lu–Hf, trace element and REE analysis // *Geostand. Newsl.* 1995. V. 19. № 1. P. 1–23.

*Williams I.S.* U–Th–Pb geochronology by ion microprobe // *Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes*. Eds. McKibben M.A., Shanks III, W.C., Ridley W.I. *Rev. Econ. Geol.* 1998. № 7. P. 1–35.

*Zhang X., Omma J., Pease V., Scott R.* Provenance of Late Paleozoic–Mesozoic sandstones, Taimyr Peninsula, the Arctic // *Geosciences*. 2013. V. 3. P. 507–527.

*Zhang X., Pease V., Omma J., Benedictus A.* Provenance of Late Carboniferous to Jurassic sandstones for southern Taimyr, Arctic Russia: a comparison of heavy mineral analysis by optical and QEMSCAN methods // *Sediment. Geol.* 2015. V. 329. P. 166–176.

*Рецензенты А.Б. Котов, Н.Б. Кузнецов*

## Provenance of the Neoproterozoic and Upper Paleozoic Siliciclastic Rocks of the Eastern Taimyr: Petrographic, Geochemical and Geochronological Data

N. S. Priyatkina<sup>a, b, #</sup>, A. K. Khudoley<sup>a</sup>, and A. V. Kuptsova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia*

<sup>b</sup>*The University of Newcastle, Newcastle, Australia*

<sup>#</sup>*e-mail: nadezhda.priyatkina@gmail.com*

The results of petrographic, geochemical and isotopic studies of the Neoproterozoic and Upper Paleozoic sandstones of the eastern Taimyr complement the existing information on their genesis and confirm their molasse nature. Sandstones and mudstones of the Neoproterozoic Stanovskaya and Posadochninskaya formations formed mainly due to erosion of magmatic and metamorphic complexes with an age of ~970–800 Ma, as well as older siliciclastic rock units. Sandstones of the Upper Paleozoic, represented by the Birrang, Sokolinsky, and Turuzov formations, are characterized by a lower degree of maturity. Most of them were formed due to erosion of magmatic and metamorphic complexes with ages of ~500 and ~300 Ma, although deposits sourced from an older provenance were identified. The ages of the youngest zircon grains for the Upper Paleozoic sandstones in some cases are close to timing of sedimentation, in others differ by more than 100 million years, indicating that maximum deposition ages must be used with caution to constrain the tectonic setting of a sedimentary basin.

*Keywords:* Arctic, Taimyr, Neoproterozoic, Paleozoic, sandstone, molasse, detrital zircon