

**ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ТЕРРИГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЛАОЕЛИН-ГРОДЕКОВСКОГО ТЕРРЕЙНА (ЗАПАДНОЕ ПРИМОРЬЕ) ПО МИНЕРАЛОГЕОХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ И РЕЗУЛЬТАТАМ U–Pb ДАТИРОВАНИЯ ДЕТРИТОВЫХ ЦИРКОНОВ**

*А.И. Малиновский, А.А. Чащин, В.В. Голозубов*

*ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, пр. 100 лет Владивостоку 159, г. Владивосток, 690022; e-mail: malinovsky@fegi.ru*

Поступила в редакцию 29 марта 2023 г.

Рассматриваются результаты комплексного изучения вещественного состава песчаных пород и U–Pb изотопного датирования детритовых цирконов из палеозойско-раннемезозойских отложений Лаоелин-Гродековского террейна Западного Приморья. Исследования показали, что по своим минералогическим параметрам разновозрастные песчаники террейна заметно различаются и, следовательно, формировались за счет различных источников питания. Накопление песчаников кордонкинской свиты происходило в результате разрушения основных и средних вулканитов океанической островной дуги, а также магматических и осадочных образований ее фундамента. На накопление песчаников решетниковской, барабашской и мангугайской свит решающее влияние оказывали размывавшиеся устойчивые кратоны и поднятые блоки основания, представлявшие собой выступы кристаллического фундамента в обрамлении рифтовых зон или вдоль трансформных разломов. Основными поставщиками материала были кислые магматические породы при участии древних осадочных образований. Областью питания пород тальминской свиты могли быть как краевые части рифтов, так и эродированная энсиалическая дуга. Проведенные U–Pb геохронологические исследования детритовых цирконов позволили выявить возраст и возможное расположение магматических комплексов, поставивших материал в осадочные бассейны террейна. Установлено, что все изученные песчаники содержат детритовые цирконы с конкордантными возрастными от 2553 до 205 млн лет, среди которых резко преобладают палеозойские цирконы, образующие несколько возрастных совокупностей. Гораздо меньше цирконов с докембрийскими и триасовыми возрастными. В целом, выявленные диапазоны возрастов детритовых цирконов из песчаников Лаоелин-Гродековского террейна достаточно хорошо согласуются с известными этапами проявления гранитоидного магматизма в восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса.

**Ключевые слова:** силур, пермь, триас, источники питания, детритовые цирконы, U–Pb изотопный возраст, Лаоелин-Гродековский террейн, Приморский край, Дальний Восток России.

#### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы широкое распространение получил метод U–Pb изотопного датирования детритовых цирконов, выделяемых из терригенных пород [1, 12, 14, 21, 26, 30–32, 43, 47, 51 и др.], поскольку его использование, в сочетании с обычными биостратиграфическими и минералогическими методами изучения осадочных пород, дает важнейшую информацию, позволяющую судить о времени накопления осадочных комплексов, возрасте и составе пород областей питания, палеогеографических и па-

леогеодинамических обстановках, существовавших в момент формирования бассейнов седиментации.

При геологических исследованиях в Центрально-Азиатском складчатом поясе, восточное окончание которого протягивается в юго-западную часть Приморского края, особое внимание отводится U–Pb изотопному датированию цирконов из магматических и метаморфических комплексов [9, 10, 19, 36, 37, 58, 60 и др.]. При этом подобных исследований детритовых цирконов из широко развитых здесь разнотипных терригенных серий практически не проводилось.

Вместе с тем, их изучение в комплексе с изучением других возможных сторон вещественного состава осадочных пород позволят более корректно, на основе палеорекострукции обстановок седиментации, а также состава и возраста пород питающих провинций, проследить определенные этапы эволюции всего складчатого пояса. Восполняя существующий пробел в U-Pb геохронологических исследованиях детритовых цирконов, нами были изучены нижнесилурийские, пермские и верхнетриасовые терригенные комплексы Лаоелин-Гродековского террейна, расположенного в юго-западной части Приморского края.

Лаоелин-Гродековский террейн является одной из важнейших тектонических структур восточной окраины Евразийского континента. По существующим представлениям, он совместно с раннепалеозойскими террейнами Бурей-Цзямусы-Ханкайского орогенного пояса (супертеррейна) образует фрагмент восточного окончания Центрально-Азиатского складчатого пояса, разделяющего Сибирский и Сино-Корейский кратоны и возникшего на месте Солонкерского палеоокеана в завершающую фазу его развития [6, 28, 57]. Террейн расположен в западной части Приморского края, где обнажена лишь краевая его часть (рис. 1). На прилегающей территории Китая террейн продолжается, при этом здесь он выделен в ранге складчатой зоны Яньбянь [9, 37]. Террейн представляет собой складчатую структуру, образованную нижнесилурийскими и пермскими терригенными и вулканогенными образованиями, пронизанными многочисленными интрузиями позднепермских-раннетриасовых гранитов. Породы сложно дислоцированы, образуя складки северо-восточного и меридионального простирания, и разбиты многочисленными разрывными нарушениями разных порядков, движения вдоль которых происходили многократно в обстановках менявшихся направлений регионального сжатия [6, 35]. В состав террейна включен небольшой тектонический блок, сложенный раннесилурийской кордонкинской свитой [35], который в свете полученных новых данных предлагается интерпретировать даже как самостоятельный Кордонкинский террейн [10]. Палеозойские отложения с угловым несогласием перекрыты верхнетриасовыми вулканогенно-осадочными и терригенными, часто угленосными образованиями.

В настоящей работе представлены результаты изучения вещественного состава нижнесилурийских, пермских и верхнетриасовых отложений террейна, что позволило определить тип и состав материнских пород областей их питания. Кроме того, в статье приведен обширный оригинальный материал по изучению изотопного U-Pb возраста детритовых

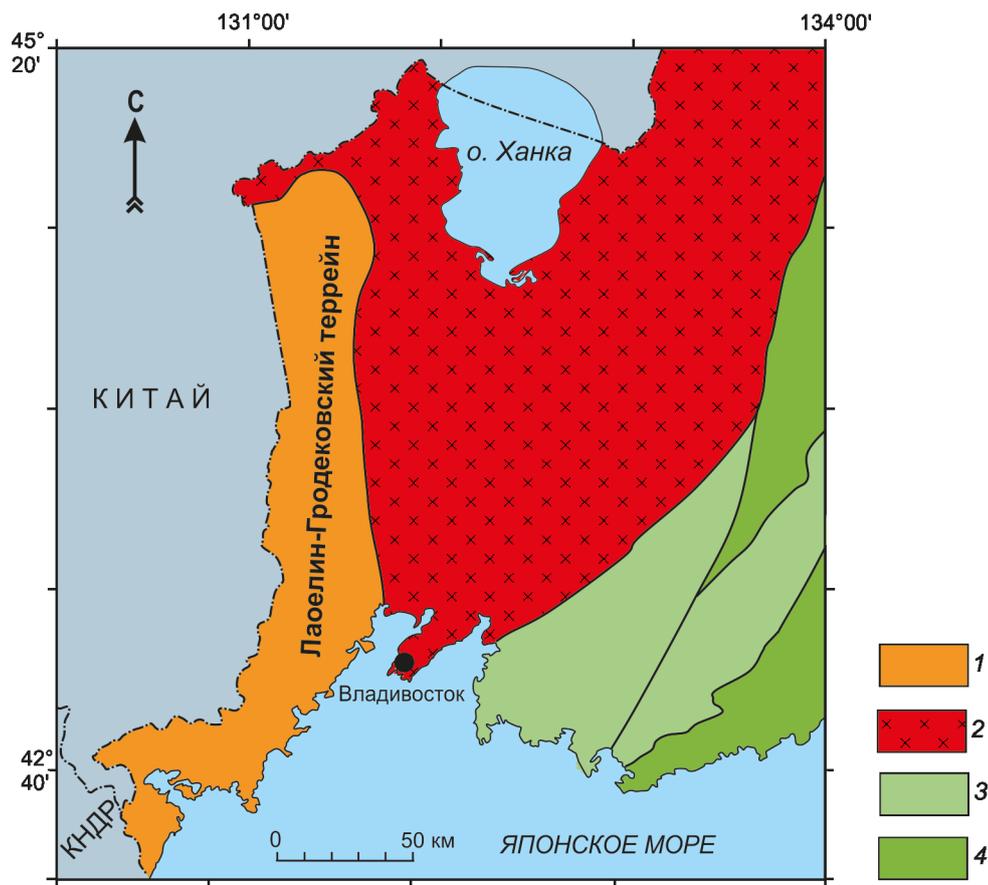
цирконов из терригенных отложений террейна, на основании которого был установлен возраст и положение основных источников питания. В дальнейшем полученные данные позволят прояснить многие актуальные вопросы, связанные с историей формирования и развития как самого террейна, так и всей южной части Центрально-Азиатского складчатого пояса.

#### ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ СТРОЕНИЯ И СОСТАВА ОТЛОЖЕНИЙ

В ходе проведенных исследований в различных частях Лаоелин-Гродековского террейна были изучены стратотипические разрезы нижнесилурийских, пермских и триасовых терригенных и вулканогенно-осадочных образований. Они имеют следующее строение.

Раннесилурийская кордонкинская свита обнажается лишь на севере террейна в виде линзовидного тектонического блока, вытянутого в меридиональном направлении на 35 км при ширине до 6 км [10, 25]. Подошва свиты не установлена, контакты с вышележащими пермскими отложениями повсеместно тектонические. Нижняя часть свиты (рис. 2) сложена лавами базальтов и андезитов, их туфами и туффитами. Значительно реже встречаются алевролиты, аргиллиты, кремнисто-глинистые породы. В верхней части преобладают песчаники, алевролиты, аргиллиты, сланцы, иногда присутствуют линзы гравелитов и конгломератов, а также горизонты кремнисто-глинистых пород, базальтов, андезитов и их туфов. Мощность отложений свиты достигает 2000 м. Раннесилурийский возраст свиты устанавливается на основании многочисленных находок остатков граптолитов и брахиопод [15, 20].

Образования пермского возраста наиболее широко распространены на территории террейна. Они расчленяются на три свиты: вулканогенную раннепермскую казачкинскую (не рассматриваемую нами в данной работе), терригенную ранне-среднепермскую решетниковскую и вулканогенно-осадочную среднепермскую барабашскую (рис. 2). Ранне-среднепермская решетниковская свита изучена как в северной, так и в южной частях террейна. Она согласно залегает на казачкинской свите. Контакты с вышележащей барабашской свитой повсеместно тектонические. Нижняя часть свиты сложена песчаниками, содержащими прослои и линзы алевролитов, аргиллитов, конгломератов и гравелитов. Верхняя часть состоит из переслаивающихся алевролитов, аргиллитов, глинистых сланцев, редких прослоев песчаников. Общая мощность отложений составляет 2100 м. Возраст сви-



**Рис. 1.** Схема расположения Лаолин-Гродековского террейна в геологической структуре Южного Приморья.

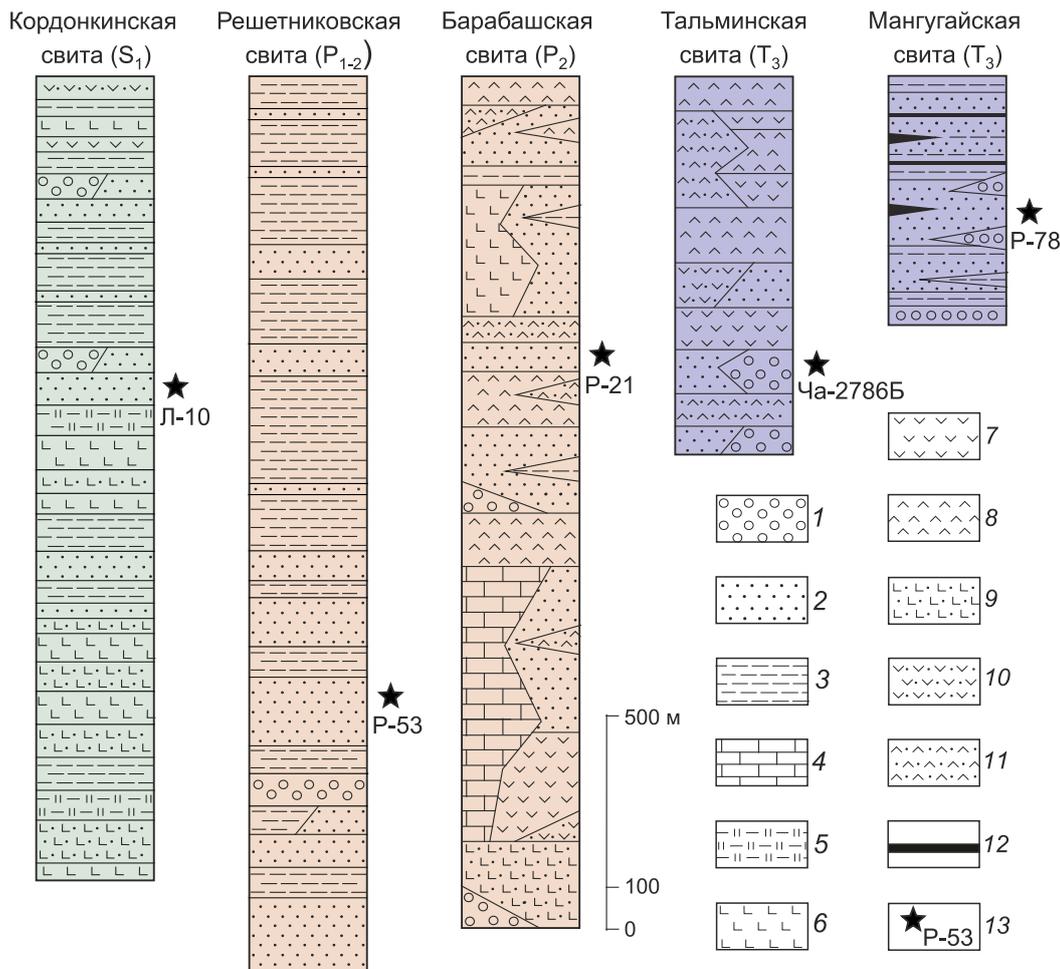
Террейны: 1 – Лаолин-Гродековский; 2 – раннепалеозойского Бурей-Цзямусы-Ханкайского орогенного пояса (супертеррейна); 3 – раннепалеозойской активной окраины, 4 – мезозойского Сихотэ-Алинь-Северо-Сахалинского орогенного пояса.

ты установлен на основании находок брахиопод, двустворок, криноидей, спикул губок, флористических комплексов [2, 13, 18].

В среднепермской барабашской свите терригенные породы известны только на юге террейна, где ее характерной особенностью является пестрота литологического состава и частая взаимная смена вулканогенных и осадочных образований, что обуславливает значительное колебание суммарной мощности – от 850 до 2100 м. Свита сложена базальтами, андезитами, риолитами, туфобрекчиями, туфами, туффитами, песчаниками, алевролитами, горизонтами и линзами конгломератов и известняков. Не исключено, что эта «свита» представляет собой фрагмент позднепермского-раннетриасового аккреционного комплекса, состоящего из многократно надвинутых тектонических пластин различного состава, возраста и происхождения [8]. Среднепермский возраст свиты обосновывается находками остатков фораминифер, мшанок, брахиопод, кораллов, двустворок, конодонтов, а также ископаемой флоры [3, 16, 17].

Отложения верхнего триаса, с разрывом и несогласием перекрывающие палеозойские образования террейна, разделяются на существенно вулканогенную тальминскую и терригенную угленосную мангугайскую свиты (рис. 2). Тальминская свита локально развита в южной и северной частях террейна. Она сложена преимущественно вулканическими породами: дацитами, риолитами, андезитами, а также их кластолавами и туфами. На севере террейна в основании свиты наблюдаются пачки и линзы конгломератов, гравелитов, песчаников и алевролитов. Суммарная мощность свиты оценивается в 600–800 м. Позднетриасовый возраст отложений обоснован находками в алевролитах ископаемой флоры [11].

В основании мангугайской свиты залегают конгломераты и гравелиты, с разрывом лежащие на подстилающих пермских вулканогенно-осадочных образованиях. Выше преобладают разнотерристые песчаники, содержащие прослои и линзы алевролитов, аргиллитов, конгломератов, туфов среднего и кислого состава, пласты углей и углистых пород,



**Рис. 2.** Литолого-стратиграфические колонки изученных палеозойских и раннемезозойских отложений Лаоелин-Гродековского террейна.

1 – конгломераты и гравелиты; 2 – песчаники; 3 – алевролиты и аргиллиты; 4 – известняки; 5 – кремнистые и кремнисто-глинистые породы; 6 – базальты; 7 – андезиты; 8 – дациты и риолиты; 9-11 – туфы и туффиты: 9 – основного, 10 – среднего, 11 – кислого состава; 12 – угли; 13 – места отбора проб на U-Pb геохронологические исследования детритовых цирконов и их номер.

приуроченных, как правило, к верхней части свиты. Общая мощность свиты колеблется от 380 до 550 м. Позднетриасовый возраст свиты установлен на основании многочисленных находок ископаемой флоры [4, 5, 34].

#### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу настоящего исследования положен оригинальный материал, полученный при изучении вещественного состава песчаных пород из нижнесилурийских, пермских и верхнетриасовых отложений Лаоелин-Гродековского террейна. Каменный материал был собран в ходе полевых исследований из естественных береговых обнажений, расположенных в бортах рек и ручьев, а также из искусственных придорожных выемок и карьеров. Изучались песчаные породы, несущие наиболее достоверную информацию о

типе и составе материнских пород областей питания, а также содержащие наибольшее количество хорошо сохранившихся детритовых цирконов.

Петрографические исследования, определение и подсчет содержаний породообразующих компонентов и тяжелых обломочных минералов осуществлялись традиционными, многократно апробированными методами, детали которых приведены в целом ряде публикаций авторов [7, 22, 23 и др.]. Определения содержаний петрогенных элементов проводились на атомно-эмиссионном спектрометре iCAP 7600 Duo (Thermo Electron Corporation, США) с индуктивно связанной плазмой. Содержания микроэлементов устанавливались на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500c (Agilent Techn., США) методом плазменной спектроскопии (ICP-MS). Аналитические исследования выполнены в Центре коллективного пользования

(ЦКП) ДВГИ ДВО РАН г. Владивостока. Аналитики П.Д. Гасанова, Г.А. Горбач, Е.В. Еловский, Н.В. Зарубина, Д.С. Остапенко, Е.А. Ткалина, Н.В. Хуркало.

Для U-Pb изотопного датирования детритовых цирконов были отобраны пробы из песчаных пород всех изученных стратиграфических подразделений террейна (рис. 2). Проба Л-10 взята из верхней, терригенной, части кордонкинской свиты, обнажающейся в карьере, расположенном в левом борту долины р. Кордонка, в точке с координатами  $44^{\circ}18'48.89''$  с.ш. и  $131^{\circ}16'52.98''$  в.д. Из нижней части решетниковской свиты, развитой на правобережье руч. Артиллерийского, отобрана проба Р-53 ( $43^{\circ}12'51.92''$  с.ш. и  $131^{\circ}21'44.30''$  в.д.). Проба Р-21 взята из верхней части барабашской свиты. Точка отбора расположена в 100 метрах от южного портала Нарвинского тоннеля ( $43^{\circ}08'07.50''$  с.ш. и  $131^{\circ}25'06.10''$  в.д.). Из залегающей в основании тальминской свиты пачки терригенных пород, обнажающейся в карьере у с. Рубиновка, отобрана проба Ча-2786Б ( $44^{\circ}41'44.90''$  с.ш. и  $131^{\circ}41'33.10''$  в.д.). Мангугайская свита опробована в разрезе, вскрытом автотрассой юго-западнее с. Занадворовка (проба Р-78,  $43^{\circ}16'37.92''$  с.ш. и  $131^{\circ}35'19.98''$  в.д.).

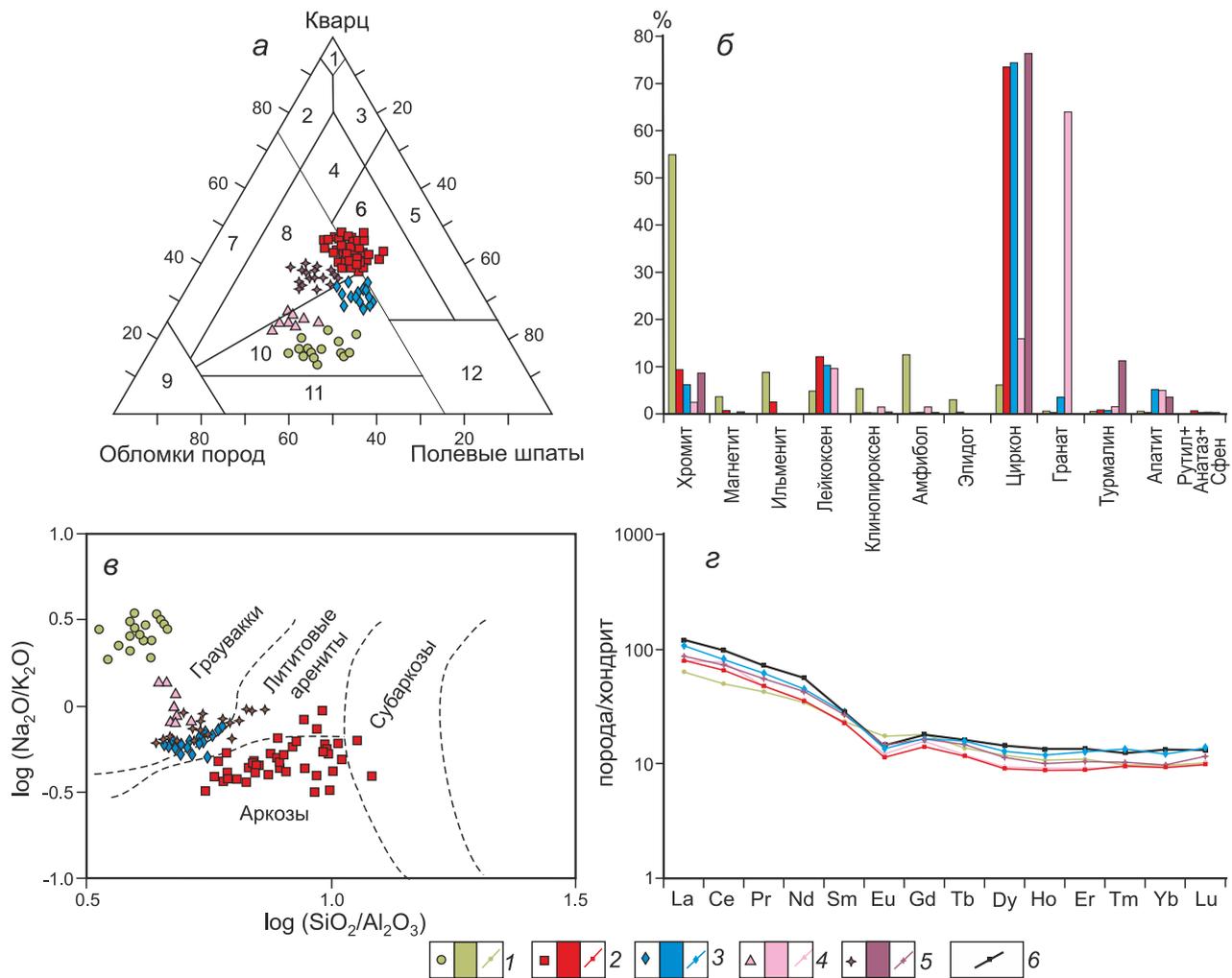
Предварительная пробоподготовка и выделение обломочных цирконов для U-Pb датирования проведены в лаборатории региональной геологии и тектоники ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток). Цирконы из пород извлекались с помощью тяжелой жидкости (бромформ), а окончательный их отбор осуществлялся вручную под бинокулярным микроскопом. Выделенные зерна помещались в эпоксидную смолу и полировались с помощью алмазных паст (9 и 1  $\mu\text{m}$ ). Далее с помощью электронного микроанализатора JXA-8100, оснащенного катодолюминесцентным детектором, в режиме катодолюминесценции (CL) были изучены морфология и внутреннее строение зерен циркона, а также выбраны точки для проведения изотопных измерений. U-Pb изотопное датирование цирконов выполнено в ЦКП «Геоспектр» Геологического института СО РАН (г. Улан-Удэ) методом лазерной абляции (LA SF-ICP-MS) на масс-спектрометре высокого разрешения Element XR, соединенного с приставкой лазерного пробоотбора UP-213 (New Wave Research) с длиной волны излучения 213 нм. Исследования выполнены В.Б. Хубановым. Детали методики изложены в работе [38].

#### ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И ВОЗМОЖНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ ТЕРРЕЙНА

Для определения тектонического типа и породного состава источников питания, поставивших обломочный материал для разновозрастных отло-

жений Лаоелин-Гродековского террейна, решающее значение имеет комплексное, детальное изучение вещественного состава участвующих в их строении песчаных пород. Отметим, что ранее в них нами был изучен состав, содержания и соотношения между пороодообразующими компонентами и тяжелыми обломочными минералами, химический состав некоторых минералов, а также геохимические особенности пород. Полученные результаты частично изложены в ряде публикаций [23–25]. В этой связи здесь приведена лишь краткая минералого-геохимическая характеристика изученных пород, дополненная некоторыми новыми данными, а также полученные результаты реконструкции тектонических типов и состава материнских пород областей питания.

В песчаниках раннесилурийской кордонкинской свиты содержится от 13 до 22 % кварца, представленного в основном монокристаллическими, остроугольными, изометричными либо слабоудлиненными зернами, часто с волнистым погасанием, что характерно для кварца из эффузивных пород. Содержание полевых шпатов варьирует от 32 до 46 %, при этом преобладают кислые плагиоклазы (55–85 %), основных и средних заметно меньше (10–30 %), а калиевые полевые шпаты редки. Среди обломков пород, в сумме составляющих от 34 до 49 %, доминируют основные и средние эффузивы (40–64 % всех обломков), меньше – терригенных (17–35 %) и кремнистых (8–21 %) пород, обломки кварцитов и сланцев редки. На классификационной диаграмме В.Д. Шутова [39] песчаники попадают в поле кварцево-полевошпатовых граувакк (рис. 3, а). В обломочной части песчаников ранне-среднепермской решетниковской свиты преобладает кварц – от 40 до 48 %. Как правило, это монокристаллические разновидности с волнистым погасанием, происходящие из кислых эффузивов, либо поликристаллические с изрезанными лапчатыми контурами зерна, свойственные для гранитоидов. Содержания полевых шпатов колеблются в пределах 25–40 %. Обычно это кислые плагиоклазы (67–82 %), меньше калиевых полевых шпатов (15–27 %), основные и средние плагиоклазы редки. Среди обломков пород (в сумме 15–45 %) доминируют кислые эффузивные и интрузивные, а также метаморфические породы (содержание каждой из этих групп в отдельных пробах достигает 45 %). По классификации В.Д. Шутова [39], песчаники относятся к полевошпатовым аркозам и, частично, полевошпатово-кварцевым грауваккам (рис. 3, а). В песчаниках среднепермской барабашской свиты содержание кварца колеблется от 28 до 35 % всех обломков. Это как чистые монокристаллические остроугольные либо слабоокатанные зерна эффузивного кварца, так и поликристалличе-



**Рис. 3.** Минералого-геохимический состав песчаных пород Лаоелин-Гродековского террейна.

*a* – классификационная диаграмма по пороодообразующим компонентам [39]. Поля типов пород: 1–4 – кварцевые песчаники: 1 – мономиктовые кварцевые, 2 – кремнекласитито-кварцевые, 3 – полевошпатово-кварцевые, 4 – мезомиктовые кварцевые; 5–6 – аркозовые песчаники: 5 – чистые или собственно аркозы, 6 – граувакковые аркозы; 7–11 – граувакковые песчаники: 7 – кварцевые граувакки, 8 – полевошпатово-кварцевые граувакки, 9 – собственно граувакки, 10 – кварцево-полевошпатовые граувакки, 11 – полевошпатовые граувакки; 12 – кристаллотуфы; *б* – средние содержания и характер распределения тяжелых обломочных минералов; *в* – классификационная диаграмма по химическому составу [29]; *г* – спектры распределения РЗЭ, нормированных по хондриту [40], и их сопоставление с PAAS [33]. Свиты: 1 – кордонкинская, 2 – решетниковская, 3 – барабашская; 4 – тальминская, 5 – мангугайская; 6 – PAAS.

ские с лапчатыми контурами зерна, характерные для гранитоидов. Полевых шпатов 34–44 %. В основном доминируют альбит и олигоклаз (62–83 %), калишпатов до 25 % (ортоклаз, редко микроклин), а основные и средние плагиоклазы малочисленны. Среди обломков пород (25–33 % всех зерен) преобладают средние и кислые эффузивные и интрузивные породы, терригенные, кремнистые и метаморфические породы гораздо более редки. На классификационной диаграмме (рис. 3, *a*) точки песчаников свиты группируются в вершине поля кварцево-полевошпатовых граувакк. Песчаники позднеэриасовой тальминской свиты содержат от 22 до 27 % кварца. Встречаются как моно-

кристаллические остроугольные зерна эффузивного кварца, так и поликристаллические, происходящие из гранитоидов. Полевых шпатов 24–35%. Преобладают кислые плагиоклазы – альбит и олигоклаз (60–80 %). Калиевых полевых шпатов (ортоклаз и микроклин) до 20 %. Основные и средние плагиоклазы редки. Обломки пород, составляющие 41–54 % объема песчаников, представлены осадочными породами (31–45 %), средними и кислыми эффузивами и гранитоидами (34–58 %). Обломки кремней и метаморфитов редки (до 16 %). Помимо этого, в породах свиты, в относительно небольшом количестве, присутствует примесь пирокластического материала: угловатые зерна пла-

гиоклазов, бесформенные фрагменты кислых эффузивов и вулканического стекла. По петрографической классификации песчаники являются кварцево-полевошпатовыми граувакками (рис. 3, а). Обломочная часть песчаников поздне триасовой мангугайской свиты содержит от 33 до 40 % кварца. Преобладают изометричные монокристаллические зерна с волнистым погасанием, а вот поликристаллические разновидности встречаются редко. Количество полевых шпатов в песчаниках варьирует от 21 до 33 %, причем это в основном кислые плагиоклазы (55–85 %), тогда как доля калиевых полевых шпатов в редких случаях достигает 30 %. Основные и средние плагиоклазы малочисленны. Обломки пород в сумме составляют 31–41 %. Среди них чаще всего встречаются средние и кислые магматические, а также разнообразные осадочные породы. Кремнистых и метаморфических пород мало. По составу песчаники свиты относятся к полевошпатово-кварцевым грауваккам (рис. 3, а).

Известно, что состав и определенные соотношения между тяжелыми обломочными минералами и их ассоциациями являются достаточно надежным индикатором различных тектонических типов источников питания, а также слагающих их исходных пород [7, 45, 53]. На рис. 3, б показаны средние содержания и характер распределения тяжелых обломочных минералов в песчаниках изученных свит, которые существенно различаются. В песчаниках кордонкинской свиты наиболее распространена фемическая ассоциация тяжелых минералов (в сумме в среднем до 92 %), связанных с разрушением основных и ультраосновных магматических пород: хромит (до 88 %), амфибол (до 50 %), пироксен (до 30 %), эпидот (до 21 %), магнетит (до 9 %). Вторую, сиалическую, ассоциацию минералов образуют циркон, гранат, турмалин и апатит – минералы, связанные с кислыми изверженными и метаморфическими породами. Суммарное содержание ассоциации крайне невелико и в среднем не превышает 8 %. Пермские отложения террейна по содержаниям и соотношениям между тяжелыми минералами довольно близки и при этом резко отличаются от образований кордонкинской свиты (рис. 3, б). Главная роль в них принадлежит уже сиалической ассоциации тяжелых минералов. Суммарное ее содержание в песчаниках решетниковской свиты в среднем составляет 75 %, а в барабашской – 84 %. Основной минерал ассоциации – циркон, среднее содержание которого в свитах 66 % и 74 %, соответственно, достигая в отдельных пробах 90–97%. Остальных минералов в ассоциации значительно меньше: турмалина до 40 %, ильменита и лейкоксена в сумме до 50 %, граната до 13 %, сфена до 3 %, апатита до 13 %, рутила и анатаза не более 1 %. Вместе с тем, в породах присутствует и

небольшое количество фемических минералов: хромита (в среднем до 9 %) и амфибола (до 3 %), указывающих на участие в составе источников сноса пород основного и ультраосновного состава. В песчаниках позднего триаса также преобладают минералы сиалической ассоциации (рис. 3, б): в тальминской свите их содержание в среднем составляет 86 %, а в мангугайской – 91 %, при этом в некоторых пробах достигает 95–99 %. Различие между свитами в том, что если в мангугайской наблюдается обычное для отложений террейна преобладание циркона (в среднем 76 %), то в тальминской главная роль уже принадлежит гранату (в среднем 64 %, а в отдельных пробах до 86 %), а вот циркона здесь заметно меньше (в среднем 16 %). Источником гранатов, вероятно, были известные в регионе выходы древних метаморфических пород [37]. Остальных минералов этой ассоциации в отложениях верхнего триаса немного: как правило, они составляют первые проценты, либо находятся в знаковых количествах. Минералы фемической ассоциации немногочисленны и в сумме не превышают 9 %.

По химическому составу песчаные породы изученных свит Лаоелин-Гродековского террейна также существенно различаются. По своим химическим параметрам песчаные породы кордонкинской свиты очень однородны: они характеризуются довольно низкими содержаниями  $\text{SiO}_2$ , варьирующими от 54.50 % до 64.51 %, но достаточно высокими суммарного железа  $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$  (6.63–9.26 %),  $\text{MgO}$  (2.36–7.83 %),  $\text{TiO}_2$  (0.61–1.19 %) и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (12.22–16.65 %). Песчаникам свойственно типичное для граувакк преобладание  $\text{Na}_2\text{O}$  над  $\text{K}_2\text{O}$  (2.26–4.39 % и 0.86–2.13 %, соответственно). На классификационной диаграмме [29] (рис. 3, в) точки составов песчаников свиты компактно группируются в поле граувакк. Среди отложений террейна также заметно выделяются песчаники решетниковской свиты. По сравнению с песчаниками других свит они обладают наиболее высокими содержаниями кремнекислоты, которые колеблются в диапазоне от 75.22 % до 86.89 %. Вместе с тем, в них заметно более низкие концентрации  $\text{TiO}_2$  (0.15–0.68 %),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (6.93–3.72 %),  $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$  (0.29–2.60 %),  $\text{MgO}$  (0.04–0.45 %) и  $\text{CaO}$  (0.02–0.53 %). Кроме того, в этих песчаниках наблюдается свойственное аркозам преобладание  $\text{K}_2\text{O}$  над  $\text{Na}_2\text{O}$  (1.86–4.06 % и 0.68–1.85 %, соответственно). По петрохимической классификации (рис. 3, в) песчаники свиты соответствуют аркозам и даже субаркозам и лишь иногда – лититовым арени-там. В песчаных породах вышележащей барабашской свиты содержания кремнекислоты значительно ниже, изменяясь в узком интервале от 68.06 % до 74.34 %. Песчаникам свиты также присущи незначительные вариации концентраций остальных петрогенных эле-

ментов:  $\text{TiO}_2$  (0.33–0.49 %),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (12.52–15.06 %),  $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$  (2.66–3.82 %),  $\text{MgO}$  (0.50–1.19 %) и  $\text{CaO}$  (0.28–2.11 %). В песчаниках свиты  $\text{K}_2\text{O}$  также преобладает над  $\text{Na}_2\text{O}$  (3.31–5.0 % и 1.78–2.83 %, соответственно), что сближает их с аркозами. Вместе с тем, на классификационной диаграмме (рис. 3, в) барабашские песчаники группируются преимущественно в поле граувакк, хотя и заметно приближаясь к лититовым ареникам и даже аркозам. Это объясняется невысоким отношением в песчаниках  $\text{SiO}_2$  к  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , что характерно для этих типов пород. По химическому составу песчаники тальминской свиты также однородны, а содержания породообразующих оксидов в них изменяется незначительно:  $\text{SiO}_2$  от 66.90 % до 71.66 %,  $\text{TiO}_2$  (0.42–0.92 %),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (13.84–15.02 %),  $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$  (2.68–4.67 %),  $\text{MgO}$  (0.73–1.26 %) и  $\text{CaO}$  (0.64–1.29 %). Содержания  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  в этих песчаниках в целом близки (1.89–3.20 % и 1.81–3.22 %, соответственно), хотя отношение  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  в среднем меньше 1, что позволяет рассматривать тальминские песчаники как граувакки. Это также хорошо подтверждается положением фигуративных точек составов на классификационной диаграмме (рис. 3, в), где они компактно группируются в соответствующем поле. Песчаники мангугайской свиты выделяются наиболее широкими пределами изменения химического состава. Содержание  $\text{SiO}_2$  в них варьирует от 70.07 % до 80.81 %,  $\text{TiO}_2$  (0.28–0.80 %),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (10.54–17.10 %),  $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$  (0.93–4.00 %),  $\text{MgO}$  (0.12–1.16 %) и  $\text{CaO}$  (0.03–7.88 %). Для пород обычно незначительное преобладание  $\text{K}_2\text{O}$  над  $\text{Na}_2\text{O}$  (1.13–2.80 % и 0.05–1.93 %, соответственно), что позволяет относить их к грауваккам и, частично, – к лититовым ареникам (рис. 3, в).

Абсолютные содержания петрогенных элементов в терригенных породах зависят не только от минерального состава их обломочной части, но и от их «зрелости», т.е. степени химического выветривания материнских пород областей питания. Уровень «зрелости» песчаных пород определяется величиной индекса химического изменения ( $\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100$ ) [54]. Для песчаников кордонкинской свиты характерны низкие его значения – от 44 до 57, что свидетельствует о преобладании в составе палеоводосбора геохимически «незрелых», слабо выветрелых пород. О заметно более высокой роли химического выветривания в областях питания для пермских и триасовых отложений свидетельствуют достаточно высокие значения индекса CIA, колеблющиеся от 55–67 в песчаниках барабашской свиты до 61–82 – в мангугайской.

Концентрации и характер распределения редких и редкоземельных элементов (РЗЭ) в песчаных породах изученных свит террейна достаточно близки. Не-

сколько выделяются песчаники кордонкинской свиты, суммарные содержания РЗЭ в которых относительно невелики и варьируют от 76 до 140 г/т. Спектры распределения РЗЭ, нормализованных к составу хондрита [40] (рис. 3, з), во всех изученных пробах свиты однотипны и характеризуются умеренной степенью фракционирования и невысоким отношением легких лантаноидов к тяжелым ( $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 3.58\text{--}8.97$ ), а также отсутствием либо слабо выраженной отрицательной европиевой аномалией ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.71\text{--}1.14$ ). В песчаных породах решетниковской свиты суммы концентрации РЗЭ, по сравнению с кордонкинской свитой, выше (90–179 г/т). Спектры распределения РЗЭ в них характеризуются более высокими отношениями  $\text{La}_N/\text{Yb}_N$  (4.81–13.66) и достаточно хорошо выраженными отрицательными европиевыми аномалиями ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.48\text{--}0.79$ ). Песчаники барабашской свиты характеризуются самыми высокими среди отложений террейна суммарными концентрациями РЗЭ – от 125 до 189 г/т. При этом спектрам распределения РЗЭ свойственны сравнительно невысокие отношения легких лантаноидов к тяжелым ( $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 6.20\text{--}11.54$ ) и отчетливо проявленные отрицательные европиевые аномалии ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.51\text{--}0.78$ ). Для песчаных пород поздне триасовых тальминской и мангугайской свит характерны относительно невысокие содержания РЗЭ (97–148 г/т и 89–167 г/т, соответственно) и спектры распределения с умеренным преобладанием легких лантаноидов над тяжелыми ( $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 6.05\text{--}8.10$  и  $5.36\text{--}10.16$ , соответственно), а также наличием выраженных отрицательных европиевых аномалий ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.55\text{--}0.69$  и  $0.61\text{--}0.85$ , соответственно). По сравнению с постархейским австралийским средним глинистым сланцем (РААС), принятым за средний состав верхней континентальной коры [33], породы всех свит незначительно (от 1.1 до 2.4 раза) обеднены как легкими, так и тяжелыми элементами, и лишь иногда некоторые из них (Eu, Gd, Tb, Dy) находятся в равных либо несколько более высоких концентрациях (рис. 3, з).

Полученные данные по минералого-геохимическому составу палеозойских и нижнемезозойских терригенных отложений Лаоелин-Гродековского террейна позволяют реконструировать тектонические типы и состав материнских пород областей питания, поставивших обломочный материал в седиментационные бассейны террейна. Палеогеодинамическая интерпретация результатов изучения вещественного состава пород обычно осуществлялась с помощью серии дискриминантных диаграмм, построенных по содержаниям и соотношениям в песчаниках породообразующих компонентов, тяжелых обломочных минералов, а также ряда индикаторных оксидов, редких и РЗЭ элементов, что позволило их авторам выделить поля, характери-

зующие различные типы областей питания и группы исходных пород (рис. 4) [41, 42, 44, 45, 55 и др.].

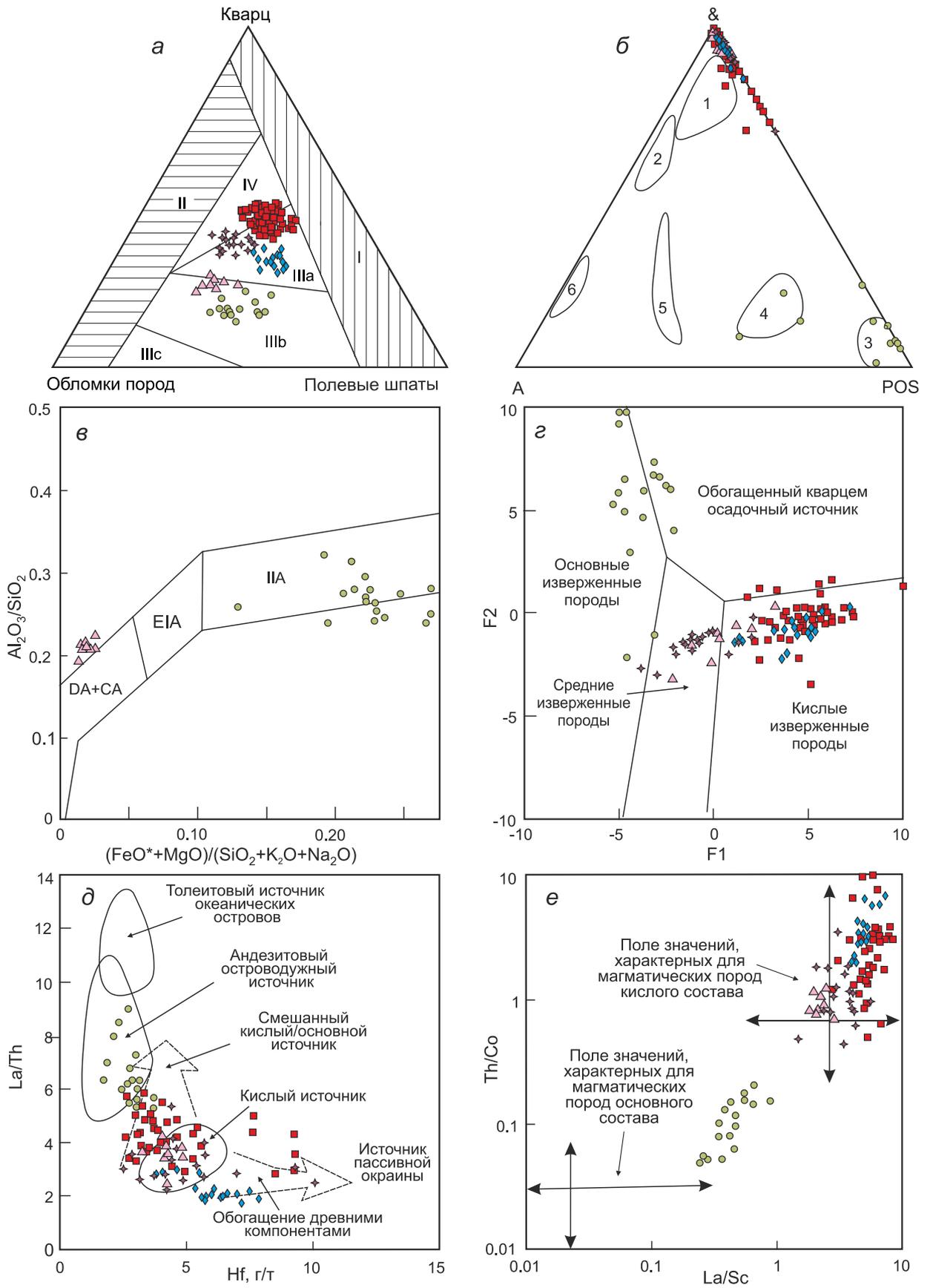
Вещественный состав песчаников раннесилурийской кордонкинской свиты свидетельствует об их принадлежности к петрогенным грауваккам, обладающим невысокой степенью зрелости кластического материала, источником которого были практически не претерпевшие химического преобразования материнские породы области сноса. Положение фигуративных точек песчаников свиты на диаграммах, предназначенных для реконструкции тектонических типов источников питания (рис. 4, а–в) [42, 45, 49], показывает, что областью питания была незрелая, практически не эродированная океаническая островная дуга. Относительно невысокие содержания в породах РЗЭ, при незначительной их обогащенности легкими элементами по сравнению с тяжелыми, отсутствие либо слабое проявление отрицательной Eu аномалии, а также локализация их точек на парных диаграммах  $F_1-F_2$ , Hf-La/Th, La/Sc-Th/Co и Zr/Sc-Th/Sc [41, 44, 55] (рис. 4, г–е), предназначенных для распознавания состава материнских пород питающих провинций, свидетельствует, что основным источником вещества были основные и средние вулканические образования дуги, а также магматические и осадочные образования ее фундамента. Генетическая интерпретация вещественного состава песчаных пород решетниковской, барабашской и мангугайской свит на диаграммах, позволяющих установить типы источников питания (рис. 4, а, б) [42, 45], свидетельствует, что на осадконакопление главное влияние оказывали размывавшиеся устойчивые кратоны и поднятые блоки основания, представлявшие собой выступы кристаллического фундамента в обрамлении рифтовых зон или вдоль трансформных разломов. Интерпретация состава песчаников тальминской свиты менее однозначна. В составе ее области питания могли участвовать как краевые части рифтов, так и достаточно глубоко эродированная окраинно-континентальная дуга. Судя по преобладанию в породах изученных свит сиалических тяжелых минералов, высоким содержаниям (особенно в решетниковской свите) кремнекислоты, низкой их фемичности, преобладанию  $K_2O$  над  $Na_2O$ , относительной обогащенности легкими РЗЭ по сравнению с тяжелыми, отчетливо выраженной отрицательной Eu аномалии, а также положению точек состава пород на дискриминантных диаграммах (рис. 4, г–е), пермские отложения решетниковской и барабашской свит формировались, главным образом, за счет разрушения кислых магматических пород при участии обогащенных кварцем осадочных источников. На накопление отложений верхнего триаса, помимо этого, также влияли и продукты размыва подстилающих пермских

средних вулканитов и осадочных пород. Обнаруженное в песчаниках тальминской свиты значительное количество обломочных гранатов может свидетельствовать о существовании в ближайшем окружении выведенных к тому времени на поверхность небольших блоков метаморфических пород, в дальнейшем быстро эродированных. Еще одним фактором, влиявшим на накопление отложений свиты, были проявления поздне триасового синседиментационного эксплозивного вулканизма, поставлявшего в бассейн относительно небольшое количество пирокластики.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ U-Pb ДАТИРОВАНИЯ ДЕТРИТОВЫХ ЦИРКОНОВ

С целью детализации состава, возраста и возможного положения вероятных источников питания, поставивших материал в седиментационные бассейны Лаоелин-Гродековского террейна, было проведено U-Pb изотопное датирование детритовых (обломочных) цирконов из песчаных пород кордонкинской, решетниковской, барабашской, тальминской и мангугайской свит.

Выделенные из песчаников кордонкинской свиты (обр. Л-10) обломочные цирконы представлены преимущественно прозрачными и полупрозрачными, нередко трещиноватыми зернами, бесцветными либо окрашенными в бледно-розовые тона (рис. 5). Наиболее распространены среди них угловато-окатанные и, реже, окатанные зерна, а также угловатые обломки кристаллов, частично сохранившие при этом свою первоначально призматическую форму. Размер таких зерен обычно составляет 100–150 мкм. Помимо этого, среди изученных цирконов отмечено незначительное количество короткопризматических кристаллов субидiomорфного облика с коэффициентом удлинения (КУ) 1.2–2.2 и размером до 200 мкм. Вершины и ребра кристаллов часто сглажены либо окатаны. В катодоллюминесцентном изображении видно, что многие зерна циркона, а также их обломки, имеют хорошо выраженную тонкую и реже грубую осцилляторную магматическую зональность. В редких случаях отмечается секториальная зональность. Достаточно надежным индикатором происхождения циркона является также величина отношения в них Th/U [30, 46, 50 и др.]. Считается, что низкие его значения свойственны цирконам метаморфического происхождения, в отличие от цирконов, происходящих из магматических пород. Граничная его величина, по мнению различных авторов, располагается на уровне 0.1–0.2 [47, 56]. Кроме того, высокие отношения  $Th/U > 1.5$  характерны для цирконов из мафических пород [48, 52]. Величина отношения Th/U в цирконах кордонкинской свиты колеблется в широких пределах – от 0.12 до 1.29,



составляя в большинстве зерен 0.30–0.66 (рис. 6). В целом, подобные характеристики свидетельствуют об их магматическом происхождении, и лишь незначительная часть кристаллов могла происходить из метаморфических пород. Наличие в песчаниках свиты заметного количества угловато-окатанных и окатанных зерен циркона может свидетельствовать о достаточно удаленном источнике разрушавшихся пород.

Цирконы из песчаников решетниковской свиты (обр. Р-53) представлены преимущественно прозрачными бесцветными или слабоокрашенными бледно-розовыми, иногда слабо трещиноватыми кристаллами с короткопризматическими и дипирамидальными очертаниями, имеющими КУ 1.5–2.7, а также их многочисленными обломками (рис. 5). Преобладают неокатанные и частично окатанные зерна, размер которых составляет 50–200 мкм, иногда достигая 250 мкм. Изучение кристаллов циркона с использованием катодной люминесценции показало, что для их внутреннего строения присуща как хорошо выраженная тонкая, так и грубая осцилляторная магматическая зональность. Величина отношения Th/U в цирконах этой свиты варьирует от 0.01 до 1.38, при этом в большинстве зерен она составляет 0.3–0.8, что позволяет классифицировать их как цирконы магматического генезиса (рис. 6).

Среди отобранных из отложений барабашской свиты (обр. Р-21) цирконов преобладают короткопризматические и дипирамидальные кристаллы с КУ 1.5–2.5, а также их обломки (рис. 5). Значительно реже встречаются кристаллы длиннопризматического облика. Вершины и ребра зерен часто сглажены либо слабо окатаны. Размер зерен от 70 до 200 мкм, реже до 230 мкм. Цирконы обычно прозрачные и полупрозрачные, бесцветные либо лиловато-розовые и кремовые. На катодолюминесцентных изображениях видно, что для внутреннего строения большинства зерен характерно присутствие хорошо выраженной тонкой и реже грубой магматической зональности, а

также редких мелких минеральных и газовой-жидких включений. Величина отношения Th/U изменяется в достаточно широких пределах – от 0.05 до 1.39, при этом в большинстве зерен она составляет 0.25–0.90, что указывает на их магматическую природу (рис. 6).

Цирконы из песчаников тальминской свиты (обр. Ча-2786Б) прозрачные бледно-розовые. Кристаллы как крупные, иногда слабо трещиноватые, удлиненно-призматические (до 200–400 мкм, КУ до 3.5), так и мелкие короткопризматические и дипирамидальные (до 100–200 мкм, КУ 1.5–2.0), хорошо ограненные, неокатанные или слабо окатанные. Также многочисленны и обломки кристаллов обеих разновидностей (рис. 5). В катодолюминесцентном излучении многие цирконы имеют хорошо выраженную тонкую осцилляторную магматическую зональность, реже она широкая грубая. Кроме того, в отдельных зернах наблюдается секториальная или фрагментарная зональность. Величина отношения Th/U в цирконах подтверждает их магматическое происхождение, варьируя от 0.02 до 1.63, а в большинстве зерен составляет от 0.3 до 0.7.

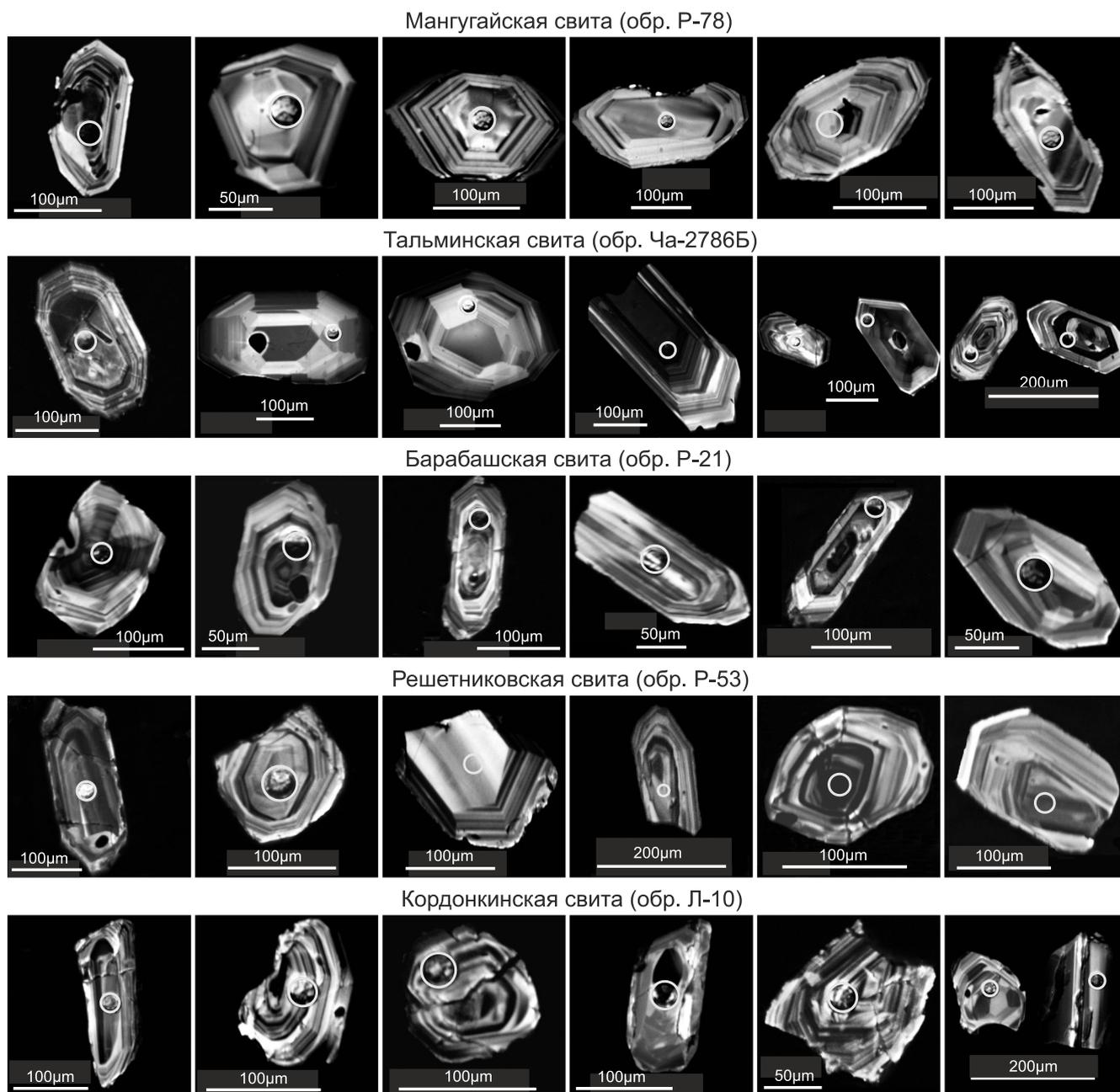
Зерна цирконов, выделенные из песчаников мангугайской свиты (обр. Р-78), представлены прозрачными бесцветными либо бледно-розовыми кристаллами с короткопризматическими, дипирамидальными и, реже, длиннопризматическими очертаниями, а также их обломками (рис. 5). Размеры зерен по длинной оси обычно составляют 70–200 мкм, иногда достигая 250–330 мкм, а КУ изменяется от 1.1 до 3.5. Зерна обычно не окатаны и лишь иногда их вершины и ребра сглажены. Для внутреннего строения большинства зерен циркона характерно присутствие хорошо выраженной тонкой и, реже, грубой и секториальной магматической зональности, изредка наблюдаются мелкие минеральные и газовой-жидкие включения. Величина отношения Th/U составляет 0.15–1.20, в большинстве же зерен 0.3–0.8 (рис. 6).

Результаты U-Pb геохронологических исследований цирконов приведены в таблице. Для рассмо-

**Рис. 4.** Возможные типы питающих провинций и составы материнских пород для терригенных пород Лаоелин-Гродековского террейна.

*a* – типы областей питания по породообразующим компонентам песчаников [42]. Типы областей питания: I – устойчивые кратоны и поднятые блоки основания, II – ремобилизованные орогены, III – магматические дуги (IIIa – расчлененные, глубоко эродированные, IIIb – переходные, IIIc – нерасчлененные, слабо эродированные), IV – смешанные источники питания; *b* – типы питающих провинций по ассоциациям тяжелых обломочных минералов [45]. Типы питающих провинций: 1 – континентальные блоки (кратоны и краевые части рифтов); 2 – коллизионные орогены; 3–6 – магматические дуги: 3 – неэродированные, 4 – переходные слабоэродированные, 5 – переходные эродированные, 6 – сильноэродированные. А – амфиболы и эпидоты; POS – клинопироксены, ортопироксены, оливины и хромиты; & – другие прозрачные минералы; *v* – типы питающих провинций магматических дуг по геохимическому составу песчаников [49]. Питающие провинции: ПА – островные океанические незрелые, ЕА – слабо эродированные островные, ДА – сильно эродированные островные, СА – окраинно-континентальные; *z-e* – возможные составы материнских пород питающих провинций на диаграммах: *z* – F1–F2 [55]; *d* – Hf–La/Th [44]; *e* – La/Sc–Th/Co [41].

Условные обозначения см. на рис. 3.



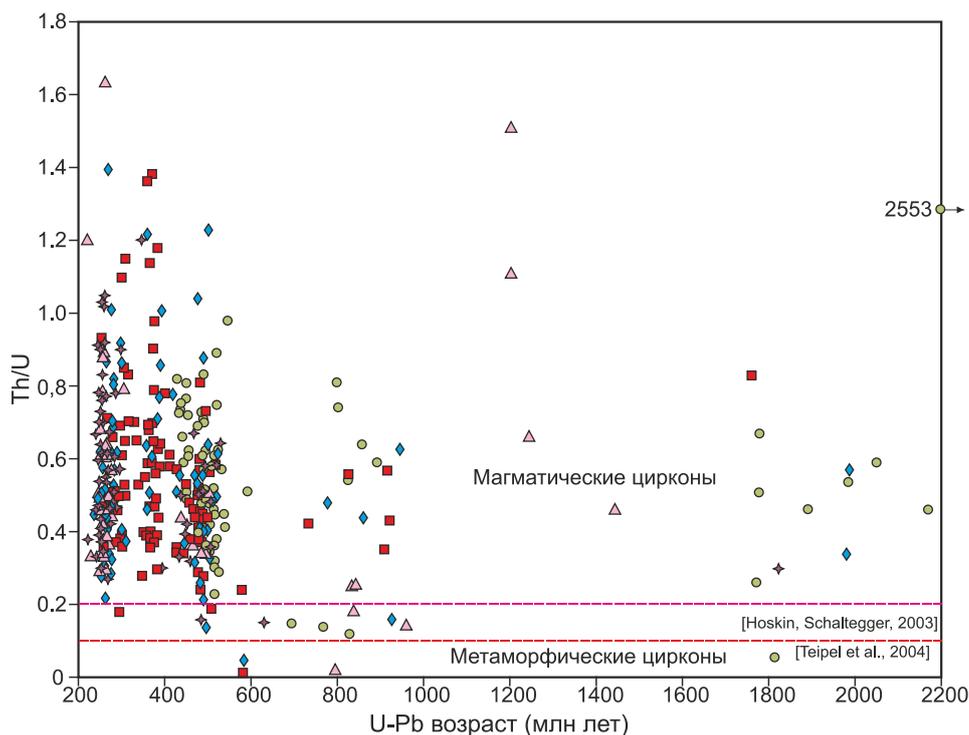
**Рис. 5.** Катодолуминесцентные изображения обломочных цирконов из песчаных пород изученных свит Лаоелин-Гродековского террейна.

Светлыми кружками показано положение абляционных кратеров.

трения и дальнейшего обсуждения использовались возрастные датировки цирконов, у которых дискордантность ( $D$ ) попадает в интервал значений от  $-10\%$  до  $+10\%$ . Все анализы, выходящие за эти пределы, из дальнейшего рассмотрения исключались. Оставшиеся датировки применялись для построения гистограмм и кривых плотности вероятности возрастов.

Из 70 изученных детритовых цирконов, выделенных из песчаников кордонкинской свиты (обр. Л-10),

конкордантными оказались датировки 67 зерен, с диапазоном возрастов от 425 до 2553 млн лет (табл.; рис. 7). Большую часть из них составляет раннепалеозойская совокупность цирконов, образованная двумя популяциями: с возрастными от 439 до 425 млн лет и пиком в 432 млн лет (силур, 10%), и от 536 до 445 млн лет и двумя пиками в 445 и 493 млн лет (кембрий–ордовик, 63%). Обращает на себя внимание, что возраст самых «молодых» изученных цирконов (439–425 млн



**Рис. 6.** Диаграмма Th/U – U-Pb изотопный возраст (млн лет) для обломочных цирконов из песчаников Лаоелин-Гродековского террейна.

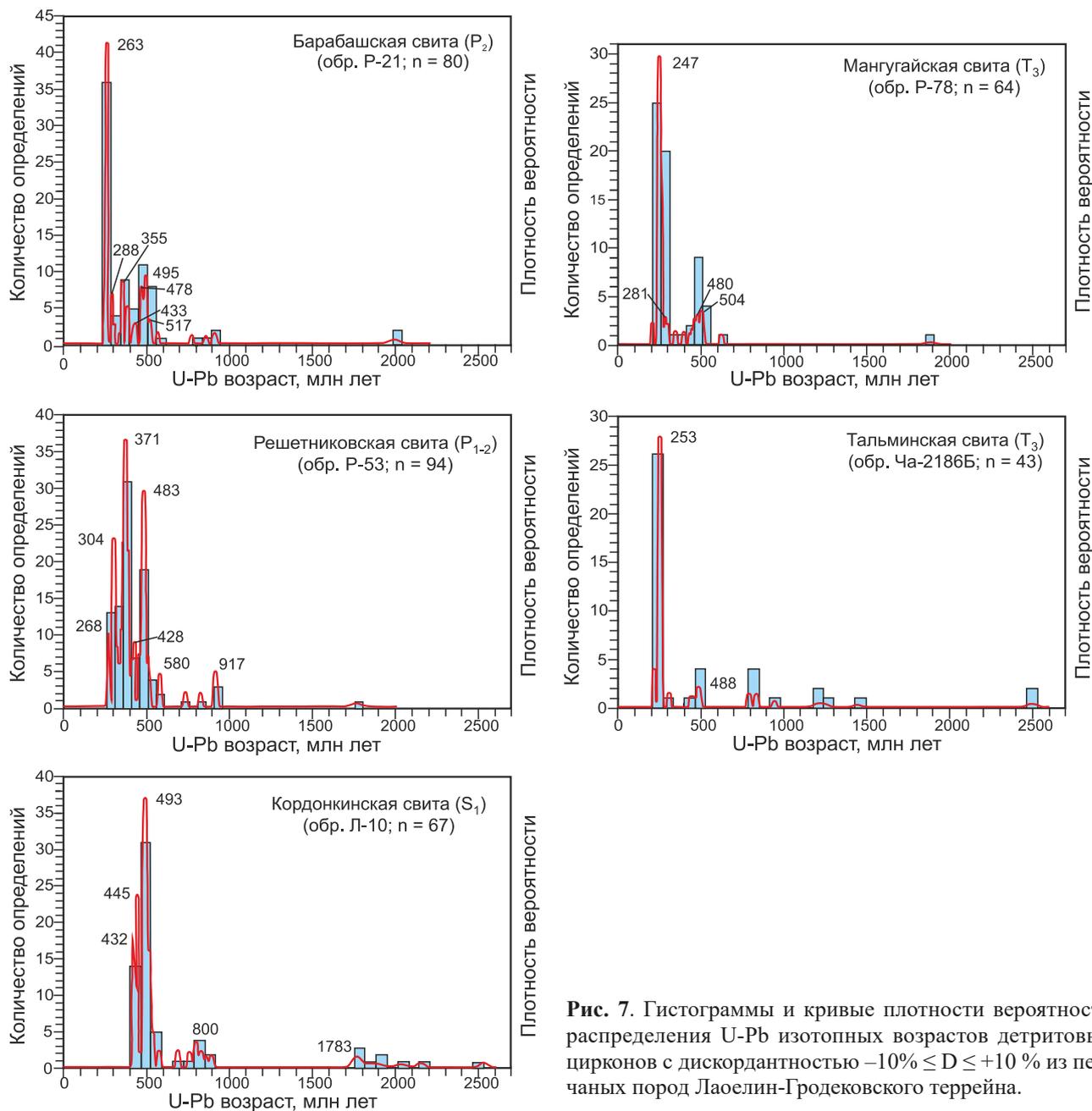
Условные обозначения см. на рис. 3.

лет) хорошо согласуется с биостратиграфическим возрастом свиты [15, 20]. Остальные 27 % зерен характеризуются позднедевонскими (892–578 млн лет) и раннедевонскими (2.5–1.7 млрд лет) возрастными пиками в 800 и 1783 млн лет.

Среди 102 детритовых цирконов из песчаников решетниковской свиты (обр. P-53) конкордантными оказались 94 зерна, характеризующиеся диапазоном возрастов от 265 до 1786 млн лет (табл.; рис. 7). Изотопные исследования показали, что наиболее многочисленную популяцию (33 %) образуют цирконы с возрастными пиками в 389 до 349 млн лет (средний девон–ранний карбон) и пиком в 371 млн лет. Несколько менее многочисленны (по 27 %) популяции с возрастными пиками от 340 до 265 млн лет (карбон–средняя пермь) и от 516 до 445 (кембрий–ордовик), образующие пики в 268, 304 и 483 млн лет, соответственно. В подчиненном количестве (5 % и 8 %) встречаются цирконы силурийско–раннедевонских (430–412, пик 428 млн лет) и широкого диапазона докембрийских (917–578 млн лет и 1.8 млрд лет) возрастов.

Для 110 зерен цирконов, отобранных из песчаников барабашской свиты (обр. P-21), получены 80 конкордантных значений возраста. Два самых древних циркона датируются палеопротерозоем (1979 и

1971 млн лет) (табл.; рис. 7). Возраст же самых молодых (249 и 247 млн лет) цирконов соответствует раннему триасу, что существенно моложе верхнего ограничения принятого стратиграфического возраста барабашской свиты (средняя пермь). Помимо этого, была обнаружена популяция цирконов (8 зерен, 10 %), возраст которых (258–252 млн лет) также моложе верхней границы стратиграфического возраста свиты, установленной на основании находок ископаемой фауны и флоры [3, 16, 17]. Все это требует проведения дальнейших совместных биостратиграфических и изотопных геохронологических исследований, подробного обсуждения и интерпретации. В целом, из общего количества конкордантных цирконов наибольшее количество зерен (50 %) попадает в возрастной интервал 300–247 млн лет с двумя пиками – 288 млн лет и 263 млн лет (ранняя и средняя пермь). Следующую возрастную популяцию (11 %) образуют цирконы, датировки которых соответствуют интервалу от 386 до 341 млн лет (средний девон–ранний карбон) с пиком в 355 млн лет. В раннепалеозойской части (интервал 523–417 млн лет) выделяются две возрастные совокупности цирконов: силурийская (436–417 млн лет с пиком 433 млн лет, 6 %) и кембрийская–раннеордовикская (523–470 млн



**Рис. 7.** Гистограммы и кривые плотности вероятности распределения U-Pb изотопных возрастов детритовых цирконов с дискордантностью  $-10\% \leq D \leq +10\%$  из песчаных пород Лаоелин-Гродековского террейна.

лет с основным пиком в 495 и второстепенными в 517 и 478 млн лет, 24 %). Цирконы с древними протерозойскими возрастными составляющими составляют около 9 %. Из них 5 зерен характеризуются неопротерозойскими возрастными – от 914 до 566 млн лет, а два наиболее древних, как отмечалось выше, датируются палеопротерозоем (1.9 млрд лет).

В общей сложности в обр. Ча-2786Б, отобранном из песчаных пород тальминской свиты, было проанализировано 55 зерен циркона, из которых для 43 были получены конкордантные оценки, укладываемые в широкий диапазон от 218 до 2496 млн лет (табл.;

рис. 7). Возраст двух самых «молодых» цирконов датируется поздним триасом (219 и 218 млн лет), что соответствует установленному по находкам ископаемой флоры возрасту свиты. Из всех изученных цирконов наиболее многочисленную популяцию (около 56 %) образуют зерна с позднепермским–среднетриасовым (258–246 млн лет) возрастом и пиком в 253 млн лет. В подчиненном количестве встречаются позднекембрийские–среднеордовикские (495–462 млн лет, пик 488 млн лет, 9 %) и протерозойские цирконы, представленные отдельными зернами и небольшими популяциями (837–789 млн лет, 944 млн лет и 2.5–1.2 млрд

лет, 26 %). Кроме того, отмечаются единичные зерна позднекарбонного (310 млн лет) и раннесилурийского (441 млн лет) возраста.

Из 111 проанализированных зерен цирконов, извлеченных из песчаников мангугайской свиты (обр. Р-78), конкордантные значения были получены для 64 зерен (табл.\*; рис. 7). Возраст самого «молодого» циркона составил 205 млн лет (конец позднего триаса), что хорошо согласуется с биостратиграфическим возрастом свиты. Самое же «древнее» зерно имеет палеопротерозойский возраст – 1781 млн лет. Диапазон возрастов самой многочисленной популяции цирконов (70 %) варьирует от 293 до 240 млн лет (пермь–средний триас). На кривой относительной вероятности возраста основной пик отвечает значению 247 млн лет, а второстепенный – 281 млн лет. В подчиненном количестве (23 %) встречаются цирконы среднекембрийского–ордовикского возраста (510–447 млн лет) с пиками в 504 и 480 млн лет. В виде единичных зерен встречаются цирконы с раннедевонскими (395 млн лет), раннесилурийскими (434 млн лет) и позднепротерозойскими (612 млн лет) возрастами.

Полученные геохронологические данные по U-Pb датированию детритовых цирконов из песчаных пород Лаоелин-Гродековского террейна позволяют выявить и детализировать петрографический состав, возраст и возможное положение питающих провинций, поставивших обломочный материал в седиментационные бассейны террейна.

Среди исследованных детритовых цирконов из песчаных пород кордонкинской свиты содержится довольно значительное количество (27 %) зерен с палео- (2.5–1.7 млрд лет) и неопротерозойскими (892–578 млн лет) возрастами. Происхождение этих цирконов вероятно связано с разрушением кристаллических комплексов Северо-Китайского кратона и Бурья-Цзямусы-Ханкайского супертеррейна [6, 12, 59]. Цирконы с аналогичными палео- и неопротерозойскими датировками устанавливаются также и в образцах из пород перми и триаса (от 8 до 26 %), что позволяет говорить о существовании единой для всех отложений террейна питающей провинции. Вместе с тем, присутствие в образце из песчаников тальминской свиты цирконов с возрастными 1.4–1.2 млрд лет свидетельствует, что в пределах кратона вероятно существовал и локальный источник цирконов этого возраста, вскрытый эрозией лишь в поздне триасовое время. Во всех изученных свитах достаточно широко (от 9 % в

тальминской до 63 % в кордонкинской) представлены цирконы с кембрийскими и ордовикскими возрастными (536–445 млн лет). Источником этих цирконов могли быть коллизионные гранитоиды раннепалеозойского Ханкайского террейна Приморья, а также других широко распространенных в регионе разновозрастных массивов и террейнов (Артемовского, Надеждинского, Цзямусы, Сунляо) [6, 12, 19, 60]. Количество детритовых цирконов с силурийскими возрастными датировками (от 441 до 424 млн лет) в изученных отложениях невелико, что связано с существенным снижением в этот период времени объемов гранитообразования [12, 19, 60]. При этом, их количество закономерно уменьшается от 10 % в кордонкинской, до единичных зерен в тальминской и мангугайской свитах. Это позволяет предполагать, что гранитные массивы этого возраста, служившие источниками цирконов, имели небольшие размеры и к поздне триасовому времени были уже практически полностью размыты и на осадконакопление заметного влияния не оказывали. Аналогичная ситуация складывается и для совокупности цирконов, имеющих девонско-раннекарбонные датировки (от 395 до 341 млн лет). Если в ниже-среднепермских отложениях решетниковской свиты они составляют треть (33 %) всех зерен, в среднепермской барабашской свите их лишь 11 %, то в поздне триасовых отложениях тальминской свиты их нет, а в мангугайской обнаружено лишь два зерна. Источниками цирконов этого возраста, вероятно, были гранитоиды, известные в целом ряде массивов: Аргунском, Хинганском, Сунляо, а также на Корейском полуострове [6, 12, 19, 60]. Последними исследованиями [9] установлено участие в строении изученной территории девонских гранитоидов, очевидно также поставивших в седиментационные бассейны Лаоелин-Гродековского террейна цирконы этого возраста. Следующая совокупность цирконов, имеющая возрастную диапозон от 340 до 299 млн лет (карбон), встречается практически только в отложениях решетниковской свиты, где она достаточно малочисленна (15 %). Их источником, вероятно, могли быть гранитоиды террейна Сунляо [12, 60], либо небольшие гранитные массивы, полностью размытые за короткий промежуток времени и в дальнейшем в осадконакоплении не участвовавшие. Наиболее же многочисленную совокупность образуют цирконы, имеющие пермские возрастные датировки (298–252 млн лет). Больше всего их в отложениях барабашской и тальминской свит (46 и 40 %) и заметно меньше в мангугайской и особенно решетниковской (30 и 12 %). Основными поставщиками цирконов были широко распространенные вдоль восточной окраины Евразии, в том числе и в юго-западной части Приморья, массивы пермских и пермс-

\*Таблицу см. на сайте журнала

ко-раннетриасовых гранитоидов. Присутствие в поздне-триасовых терригенных отложениях мангугайской и тальминской свит заметного количества (39 и 18 %, соответственно) ранне-среднетриасовых детритовых цирконов (240–251 млн лет) позволяет говорить о существенном влиянии на формирование их отложений все тех же позднепермских-среднетриасовых гранитоидных интрузий [6, 27, 36]. Учитывая тот факт, что детритовые цирконы из песчаников мангугайской и тальминской свит часто имеют хорошо сохранившиеся кристаллографические формы, обломочный материал самих песчаников слабо окатан и отсортирован, а в разрезах отложений присутствуют горизонты и линзы конгломератов, можно предположить близость источников сноса и высокую, в условиях расчлененного рельефа, скорость накопления отложений. Этими источниками, очевидно, были многочисленные гранитоидные массивы, входящие в состав Лаоелин-Гродековского террейна, где они пронизывают все нижележащие отложения. Так, например, источником верхнепермских детритовых цирконов тальминской свиты, вероятно, были гранитоиды крупного Комиссаровского массива, находящегося в непосредственной близости к области накопления отложений свиты. Имеющиеся U-Pb датировки свидетельствуют, что внедрение гранитоидов этого массива происходило в интервале 268–248 млн лет [27, 36]. Появление в песчаниках террейна самой молодой популяции циркона (в тальминской свите 2 зерна, 219 и 218 млн лет, а в мангугайской – 1 зерно, 205 млн лет), по-видимому, связано с масштабным проявлением на территории Западного Приморья синхронного осадконакоплением поздне-триасового вулканизма, сопровождавшегося эксплозивным извержением пеплового материала, вероятно и содержавшего эти цирконы. О синхронности вулканизма и осадконакопления свидетельствует переслаивание в нижней части разреза тальминской свиты лавовых потоков андезитов и песчаников, содержащих примесь пирокластики.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для определения тектонических типов и породного состава источников питания, оказывавших влияние на формирование палеозойских и раннемезозойских отложений Лаоелин-Гродековского террейна, был изучен вещественный состав песчаников: содержания и количественные соотношения породобразующих компонентов, тяжелых обломочных минералов, геохимические особенности пород. Помимо этого, с целью детализации состава, возраста и возможного положения источников питания было проведено U-Pb изотопное датирование детритовых цирконов, отобранных из отложений всех изученных свит.

Проведенные исследования состава песчаников показали, что по вещественному составу породы свит существенно различаются и, следовательно, формировались за счет разрушения различных источников питания.

Песчаники раннесилурийской кордонкинской свиты по своим минералого-геохимическим параметрам соответствуют типичным грауваккам и являются петрогенными или “first cycle” породами, прошедшими лишь один цикл переотложения. Они формировались преимущественно за счет механического разрушения геохимически «незрелых», слабо выветрелых пород источников сноса и характеризуются слабой литодинамической переработкой и сортировкой обломочного материала, а также относительно высокой скоростью его захоронения. Палеогеодинамическая интерпретация всей совокупности полученных в процессе исследования данных свидетельствуют, что областью питания, поставившей обломочный материал для отложений свиты, была океаническая островная дуга, сложенная основными и средними вулканитами, а также магматическими и осадочными образованиями, входившими в состав ее фундамента.

В вещественном составе песчаных пород перми и триаса наблюдаются определенные сходства и различия. По минералого-петрохимическим параметрам песчаники решетниковской свиты соответствуют аркозам и, частично, лититовым ареникам. К типу лититовых ареников также относится некоторая часть песчаников из отложений барабашской и мангугайской свит. Большая же часть песчаников этих свит, а также породы тальминской свиты определяются как граувакки. Породы всех свит, несмотря на упомянутые различия, характеризуются достаточно высокой степенью зрелости, что свидетельствует о значительном химическом выветривании материнских пород источников сноса. Петрохимические особенности рассматриваемых отложений указывают на преимущественно литогенную природу кластики, прошедшей не один цикл переотложения, но и при определенной доле участия петрогенного материала.

Интерпретация вещественного состава песчаников решетниковской, барабашской и мангугайской свит свидетельствует, что в их случае на осадконакопление главное влияние оказывали размывавшиеся устойчивые кратоны и поднятые блоки основания, представлявшие собой выступы кристаллического фундамента в обрамлении рифтовых зон или вдоль трансформных разломов. Отложения формировались, главным образом, за счет разрушения кислых магматических пород при участии обогащенных кварцем пород осадочного происхождения. Происхождение

песчаников тальминской свиты менее однозначно. В состав области ее питания могли входить как краевые части рифтов, так и достаточно глубоко эродированная окраинно-континентальная дуга. Присутствие в тальминских песчаниках значительного количества обломочных гранатов позволяет предполагать, что в размыт также были вовлечены и выведенные в этот момент времени на поверхность небольшие блоки метаморфических пород, в дальнейшем быстро эродированные. Кроме того, на накопление отложений свиты дополнительное влияние оказывали проявления поздне-триасового синседиментационного эксплозивного вулканизма, поставившего в бассейн относительно небольшое количество пирокластического материала.

Проведенные U-Pb геохронологические исследования детритовых цирконов из песчаных пород Лаоелин-Гродековского террейна позволили установить возраст магматических пород и возможное положение питающих провинций, за счет разрушения которых сформировались его палеозойские и раннемезозойские терригенные отложения. Полученные результаты показали, что конкордантные U-Pb изотопные возрасты изученных цирконов варьируют в широком диапазоне: от неоархея (2553 млн лет) до позднего триаса. Следует отметить, что возраст самых «молодых» популяций цирконов из песчаных пород кордонкинской, решетниковской, мангунайской и тальминской свит хорошо согласуется с установленными биостратиграфическими возрастными этими образований. Вместе с тем, в породах барабашской свиты была обнаружена совокупность цирконов, возраст которых (247–258 млн лет) оказался моложе принятого для нее верхнего стратиграфического ограничения (средняя пермь). С учетом близких возрастных датировок, полученных при изучении цирконов из туффитов барабашской свиты [8], можно сделать предположение о ранне-среднетриасовом времени ее формирования. Для окончательного решения этого вопроса требуются дополнительные исследования.

Установленные в подавляющем большинстве изученных цирконов величины отношения  $Th/U > 0.2$  позволяют говорить об их магматическом происхождении, и лишь незначительная часть зерен могут считаться метаморфическими. Кроме того, в катоднOLUMИнесцентном излучении многие зерна циркона имеют хорошо выраженную осцилляционную зональность, что подтверждает их магматическую природу. Среди изученных цирконов возможное метаморфическое происхождение ( $Th/U < 0.2$ ) имеют зерна преимущественно неопротерозойского возраста (944–566 млн лет) (табл., рис. 6).

Полученные результаты U-Pb геохронологических исследований показывают, что в песчаных породах

Лаоелин-Гродековского террейна резко преобладают палеозойские детритовые цирконы, образующие несколько совокупностей. В меньших количествах присутствуют цирконы с докембрийскими и раннемезозойскими (триасовыми) возрастными.

Среди имеющих широкий возрастной диапазон докембрийских цирконов выделяются две совокупности: палео- (2.5–1.7 млрд лет) и неопротерозойского (892–578 млн лет) возраста. Источниками этих цирконов вероятно были кристаллические комплексы Северо-Китайского кратона и Буря-Цзямусы-Ханкайского супертеррейна. Присутствие, помимо того, в отложениях тальминской свиты небольшой популяции цирконов с мезопротерозойскими возрастными (1.4–1.2 млрд лет) свидетельствует, что в этот отрезок времени на поверхность был выведен локальный магматический источник цирконов этого возраста.

Палеозойские-раннемезозойские детритовые цирконы имеют несколько возрастных интервалов: 536–445, 441–424, 395–341, 340–299 и 298–240 млн лет. Присутствие в песчаниках изученных свит (а в силурийской кордонкинской свите и преобладание) заметного количества цирконов ордовикского и кембрийского возрастов (536–445 млн лет) позволяет предполагать, что основными их поставщиками были раннепалеозойские коллизионные граниты все того же Буря-Цзямусы-Ханкайского супертеррейна, а также других широко распространенных в регионе разновозрастных массивов и террейнов. Следует отметить, что наличие в песчаниках кордонкинской свиты заметного количества угловато-окатанных и окатанных зерен циркона может свидетельствовать о достаточной удаленности источника сноса или/и рециклинге обломочного материала. При этом, минералого-геохимические данные [25] указывают на формирование отложений свиты в бассейне, связанном с океанической островной дугой, что также может указывать на удаленность источников детритовых цирконов.

Количество детритовых цирконов с силурийскими, девонскими и карбоновыми возрастными (от 441 до 299 млн лет) во всех изученных отложениях невелико, что связано с существенным снижением в этот период времени объемов гранитообразования. При этом и характер распределения их содержания по свитам существенно различается. Так количество цирконов с силурийскими и девонско-раннекарбоновыми датировками закономерно уменьшается вверх по разрезу, вплоть до практически полного их исчезновения в верхнетриасовых отложениях тальминской и мангунайской свит. А вот относительно малочисленная популяция с позднекарбоновыми возрастными встречается практически только в отложениях решетниковской свиты, в дальнейшем полностью исчезающая. Очевидно,

что источники цирконов этого широкого возрастного диапазона были редки, имели небольшие размеры и к позднему триасу большинство из них были уже практически полностью эродированы, не оказывая заметного влияния на осадконакопление. Гранитоиды этих возрастов известны, например, в террейне Сунляо, а также на Корейском полуострове.

Во всех изученных свитах самую многочисленную популяцию образуют цирконы, имеющие пермско-среднетриасовые возрастные датировки (298–240 млн лет). Основными их поставщиками были, очевидно, широко распространенные в регионе, в том числе и входящие в состав Лаоелин-Гродековского террейна, массивы пермских и триасовых гранитоидов. Появление в верхнетриасовых песчаниках тальминской и мангугайской свит самой молодой популяции циркона (219–205 млн лет), вероятно, связано с проявлением на территории синседиментационной эксплозивной вулканической деятельности, выносившей пепловый материал, который и содержал эти цирконы.

Таким образом, проведенные U-Pb геохронологические исследования детритовых цирконов из терригенных отложений Лаоелин-Гродековского террейна позволили выделить ряд их совокупностей, возраст которых достаточно хорошо согласуется с известными этапами проявления в восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса гранитоидного магматизма.

В целом же, полученные минералого-геохимические данные, а также результаты U-Pb геохронологического датирования детритовых цирконов, свидетельствуют, что формирование палеозойско-раннемезозойских терригенных отложений Лаоелин-Гродековского террейна происходило за счет разрушения различных магматических, метаморфических и осадочных комплексов. Во время накопления отложений кордонкинской свиты главным источником сноса были основные и средние вулканы океанической островной дуги, а также магматические и осадочные образования ее фундамента. Вместе с тем, с континента поступали и продукты разрушения древних кристаллических пород. Существенная роль в формировании пермских и верхнетриасовых отложений принадлежала продуктам размыва палеозойских и раннемезозойских гранитоидов, расположенных в пределах восточной части Центрально-Азиатского складчатого пояса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-05-00037).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бадида Л.В., Маслов А.В., Мизенс Г.А. Реконструкция состава пород питающих провинций. Статья 4. Современные методы исследования тяжелых обломочных минералов (цирконов, апатитов) // Литосфера. 2020. Т. 20, № 3. С. 363–385.
- Бураго А.И., Котляр Г.В. Решетниковская свита Западного Приморья // Палеозой Дальнего Востока. Хабаровск: ДВНЦ АН СССР, 1974. С. 258–267.
- Бураго В.И. Владивостокский горизонт верхней перми Юго-Западного Приморья // Новые данные по биостратиграфии палеозоя и мезозоя юга Дальнего Востока. Владивосток: ДВО АН СССР, 1990. С. 81–102.
- Бурий И.В. Угленосные отложения триаса Южного Приморья // Осадочные и вулканогенно-осадочные формации Дальнего Востока. Владивосток: ДВФ СО АН СССР, 1968. С. 83–87.
- Бурий И.В., Захаров Ю.Д., Жарникова Н.К. Позднетриасовые цефалоподы Приморья // Новые данные по биостратиграфии палеозоя и мезозоя юга Дальнего Востока. Владивосток: ДВО РАН, 1990. С. 141–158.
- Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с.
- Геосинклинальный литогенез на границе континент–океан / Под ред. П.В. Маркевич. М.: Наука, 1987. 177 с.
- Голозубов В.В., Крук Н.Н., Киселев В.И., Руднев С.Н., Касаткин С.А., Крук Е.А. Первые свидетельства среднетриасового вулканизма в южном Приморье // Тихоокеан. геология. 2017. Т. 36, № 2. С. 44–57.
- Голозубов В.В., Ханчук А.И. Хейлунцзянский комплекс – фрагмент юрской аккреционной призмы в тектонических окнах перекрывающей континентальной плиты: модель плоской субдукции // Тихоокеан. геология. 2021. Т. 40, № 4. С. 3–17.
- Голозубов В.В., Малиновский А.И., Чащин А.А., Кандауров А.Т., Хубанов В.Б., Касаткин С.А., Желдак М.В., Оруджев Т.В. Кордонкинский террейн – фрагмент раннепалеозойской активной окраины // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2021. Вып. 52, № 4. С. 61–72.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:1 000 000. Лист L-52 (3-е поколение). Серия Дальневосточная. Объясн. зап. / Под ред. С.В. Коваленко. СПб.: Картограф. фабрика ВСЕГЕИ, 2011. 684 с.
- Диденко А.Н., Ото Ш., Кудымов А.В., Песков А.Ю., Архипов М.В., Мияке Ю., Нагата М. Возраст цирконов из осадочных пород Хабаровского, Самаркинского и Журавлевско-Амурского террейнов северной части Сихотэ-Алиньского орогенного пояса: тектонические следствия // Тихоокеан. геология. 2020. Т. 39, № 1. С. 3–23. DOI: 10.30911/0207-4028-2020-39-1-3-23
- Зимица В.Г. Флора ранней и начала поздней перми Южного Приморья. М.: Наука, 1977. 127 с.
- Ивлева А.С., Подковыров В.Н., Ершова В.Б., Анфинсон О., Худoley А.К., Федоров П.В. Результаты U-Pb (LA-ICP-MS)-датирования обломочных цирконов из верхневендско-нижнекембрийских отложений востока Балтийской моноклизы // Докл. АН. 2016. Т. 468, № 4. С. 441–446.
- Изосов Л.А., Кандауров А.Т., Баженов В.А., Корень Т.Н., Шишкина Г.Р., Колобова И.М., Кулькова Н.П. Силурийские отложения Приморья // Тихоокеан. геология. 1988. № 5. С. 75–82.
- Котляр Г.В., Захаров Ю.Д., Кропачева Г.С., Пронина Г.П.,

- Чедия И.О., Бураго В.И. Позднепермский этап эволюции органического мира: Мидийский ярус СССР. Л.: Наука, 1989. 184 с.
17. Котляр Г.В., Никитина А.П., Журавлев А.В., Коссовая О.Л. Мидийские (вордско-кептенские) транзитные фауны Юго-Восточной Азии // БМОИП. Отд. геол. 2003. Т. 78, Вып. 1. С. 33–48.
18. Котляр Г.В. Пермские отложения Южного Приморья – ключ к прослеживанию ярусных подразделений Международной и Общей стратиграфических шкал // Тихоокеан. геология. 2015. Т. 34, № 4. С. 19–38.
19. Крук Н.Н., Голозубов В.В., Киселев В.И., Крук Е.А., Руднев С.Н., Серов П.А., Касаткин С.А., Москаленко Е.Ю. Палеозойские гранитоиды южной части Вознесенского террейна (Южное Приморье): возраст, вещественный состав, источники расплавы и обстановки формирования // Тихоокеан. геология. 2018. Т. 37, № 3. С. 32–53.
20. Кульков Н.П. Силурийские брахиоподы Дальнего Востока России и их биогеографические связи. Новосибирск: СНИИГИМС. 2009. 43 с.
21. Летникова Е.Ф., Кузнецов А.Б., Вишневская И.А., Вещева С.В., Прошенкин А.И., Джен Х. Вендская пассивная континентальная окраина юга Сибирской платформы: геохимические и изотопные (Sr, Sm-Nd) свидетельства и данные U-Pb датирования LA-ICP-MS детритовых цирконов // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 10. С. 1507–1529.
22. Малиновский А.И., Голозубов В.В. Строение, состав и обстановки формирования нижнемеловых отложений Журавлевского террейна (Центральный Сихотэ-Алинь) // Литология и полез. ископаемые. 2012. № 4. С. 399–424.
23. Малиновский А.И. Палеозойские и раннемезозойские терригенные отложения Юго-Западного Приморья: вещественный состав и происхождение // Вестн. ДВО РАН. 2020. № 5. С. 51–67.
24. Малиновский А.И. Геохимические особенности и палеогеодинамические обстановки накопления пермских и триасовых отложений Юга Лаоелин-Гродековского террейна (Приморье) // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2021. Вып. 52, № 4. С. 46–60.
25. Малиновский А.И., Голозубов В.В. Нижнесилурийские терригенные отложения Лаоелин-Гродековского террейна (Южное Приморье): вещественный состав и обстановки формирования // Тихоокеан. геология. 2021. Т. 40, № 1. С. 25–44.
26. Маслов А.В., Мизенс Г.А., Вовна Г.М., Киселев В.И., Ронкин Ю.Л. Обломочные цирконы из песчаников нижнего триаса Бельской впадины Предуралья: LA-ICP-MS U-Pb изотопные возрасты и распределение редких и рассеянных элементов // Литосфера. 2016. № 1. С. 7–28.
27. Неволин П.Л., Уткин В.П., Митрохин А.Н., Кутуб-Заде Т.К. Геологическое строение Западного Приморья: динамика структурирования // Тихоокеан. геология. 2012. Т. 31, № 4. С. 17–37.
28. Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И., Бадарч Г., Беличенко В.Г., Булгагов А.Н., Дриль С.И., Кириллова Г.Л., Кузьмин М.И., Ноклеберг У., Прокопьев А.В., Тимофеев В.Ф., Томуртогоо О., Янь Х. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеан. геология. 2003. Т. 22, № 6. С. 7–41.
29. Петтиджон Ф.Дж., Поттер П., Сивер Р. Пески и песчаники. М.: Мир, 1976. 535 с.
30. Романюк Т.В., Кузнецов Н.Б., Белоусова Е.А., Горожанин В.М., Горожанина Е.Н. Палеотектонические и палеогеографические обстановки накопления нижнерифейской айской свиты Башкирского поднятия (Южный Урал) на основе изучения детритовых цирконов методом «TerraneChrono®» // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9, № 1. С. 1–37.
31. Соболев И.Д., Соболева А.А., Удоратина О.В., Канева Т.А., Куликова К.В., Викентьев И.В., Хубанов В.Б., Буянтуев М.Д., Хоуриган Дж.К. Первые результаты U-Pb (LA-ICP-MS) датирования детритовых цирконов из палеозойских островодужных обломочных пород Полярного Урала // БМОИП. Отд. геол. 2017. Т. 92, Вып. 4. С. 3–26.
32. Сорокин А.А., Смирнова Ю.Н., Котов А.Б., Ковач В.П., Сальникова Е.Б., Попеко Л.И. Источники и области сноса палеозойских терригенных отложений Ольдойского террейна Центрально-Азиатского складчатого пояса: результаты Sm-Nd изотопно-геохимических и U-Pb геохронологических (LA-ICP-MS) исследований // Геохимия. 2015. № 6. С. 539–550.
33. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 384 с.
34. Триас и юра Сихотэ-Алиня. Кн. 1. Терригенный комплекс / Под ред. П.В. Маркевич, Ю.Д. Захаров. Владивосток: Дальнаука, 2004. 417 с.
35. Ханчук А.И., Раткин В.В., Рязанцева М.Д., Голозубов В.В., Гонохова Н.Г. Геология и полезные ископаемые Приморского края / Очерк. Владивосток: Дальнаука, 1995. 82 с.
36. Ханчук А.И., Сахно В.Г., Аленичева А.А. Первые U-Pb SHRIMP-датирования по цирконам магматических комплексов Юго-Западного Приморья // Докл. АН. 2010. Т. 431, № 4. С. 516–520.
37. Ханчук А.И., Аленичева А.А., Голозубов В.В., Кандауров А.Т., Юрченко Ю.Ю., Сергеев С.А. Ханкайский массив: гетерогенность фундамента и региональные корреляции // Тихоокеан. геология. 2022. Т. 41, № 4. С. 3–22.
38. Хубанов В.Б., Буянтуев М.Д., Цыганков А.А. U-Pb изотопное датирование цирконов из PZ3-MZ магматических комплексов Забайкалья методом магнитно-секторной масс-спектрометрии с лазерным пробоотбором: процедура определения и сопоставление с SHRIMP данными // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 1. С. 241–258.
39. Шутов В.Д. Классификация песчаников // Литология и полез. ископаемые. 1967. № 5. С. 86–102.
40. Boynton W.V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies // Rare earth element geochemistry / Ed. P. Henderson. Amsterdam: Elsevier, 1984. P. 63–114.
41. Cullers R.L. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA // Chem. Geol. 2002. V. 191. P. 305–327.
42. Dickinson W.R., Suczek C.A. Plate tectonics and sandstone composition // Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull. 1979. V. 63, N 12. P. 2164–2182.
43. Dickinson W.R., Lawton T.F., Gehrels G.E. Recycling detrital zircons: a case study from the Cretaceous Bisbee Group of southern Arizona // J. Geol. 2009. V. 37, N 6. P. 503–506.
44. Floyd P.A., Leveridge B.E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones // J. Geol. Soc. London. 1987. V. 144. P. 531–542.

45. Garzanti E., Ando S. Plate tectonics and heavy mineral suites of modern sands // *Heavy minerals in use. Developments in sedimentology* / Eds M.A. Mange, D.T. Wright. Amsterdam: Elsevier, 2007. V. 58. P. 741–764.
46. Hartmann L.A., Santos J.O.S. Predominance of high Th/U, magmatic zircon in Brazilian Shield sandstones // *Geol.* 2004. V. 32, N 1. P. 73–76.
47. Hoskin P.W.O., Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis / Eds J.M. Hanchar and P.W.O. Hoskin // *Rev. Mineral. Geochem.* 2003. V. 53, N 1. P. 27–62.
48. Kaczmarek M.A., Müntener O., Rubatto D. Trace element chemistry and U–Pb dating of zircons from oceanic gabbros and their relationship with whole rock composition (Lanzo, Italian Alps) // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2008. V. 55, N 3. P. 295–312.
49. Kiminami K., Kumon F., Nishimura T., Shiki T. Chemical composition of sandstones derived from magmatic arcs. Composition and origin of clastic rocks from mobile belts (examples from the Japanese Islands) // *Memoirs Geol. Soc. Japan.* 1992. V. 38. P. 361–372.
50. Kirkland C.L., Smithies R.H., Taylor R.J.M., Evans N., McDonald B. Zircon Th/U ratios in magmatic environs // *Lithos.* 2015. V. 212–215. P. 397–414.
51. Lauri L.S., Andersen T., Holtta P., Huhma H., Graham S. Evolution of the Archaean Karelian province in the Fennoscandian Shield in the light of U–Pb zircon ages and Sm–Nd and Lu–Hf Isotope systematics // *J. Geol. Soc. London.* 2011. V. 168, N 1. P. 201–218.
52. Linnemann U., Ouzegane K., Drareni A., Hofmann M., Becker S., Gärtner A., Sagawe A. Sands of West Gondwana: an archive of secular magmatism and plate interactions – a case study from the Cambro-Ordovician section of the Tassili Ouan Ahaggar (Algerian Sahara) using U–Pb–LA–ICP–MS detrital zircon ages // *Lithos.* 2011. V. 123, N 1–4. P. 188–203.
53. Nechaev V.P., Ispording W.C. Heavy-mineral assemblages of continental margins as indicators of plate tectonic environments // *J. Sed. Petrol.* 1993. V. 63, N 6. P. 1110–1117.
54. Nesbitt H.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // *Nature.* 1982. V. 299. P. 715–717.
55. Roser B.P., Korsch R.J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data // *Chem. Geol.* 1988. V. 67. P. 119–139.
56. Teipel U., Eichhorn R., Loth G., Rohrmüller J., Holl R., Kennedy A., U–Pb SHRIMP and Nd isotopic data from the western Bohemian Massif (Bayerischer Wald, Germany): implications for Upper Vendian and Lower Ordovician magmatism // *Intern. J. Earth Sci.* 2004. V. 93, N 5. P. 782–801.
57. The central Asian orogenic belt: geology, evolution, tectonics and models / Ed. A. Kröner. Stuttgart: Borntraeger Sci. Publ., 2015. 313 p.
58. Tsutsumi Y., Yokoyama K., Kasatkin S.A., Golozubov V.V. Zircon U–Pb age of granitoids in the Maizuru Belt, southwest Japan and Voznesenka Belt, Far East Russia // *J. Mineral. Petrol. Sci.* 2014. V. 109. P. 97–102.
59. Wan T. The tectonics of China: data, maps and evolution. Springer Higher Education Press. Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. 501 p.
60. Wu F.Y., Sun D.Y., Ge W.C., Zhang Y.B., Grant M.L., Wilde S.A., Jahn B.M. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China // *J. Asian Earth Sci.* 2011. V. 41. P. 1–30.

*Рекомендована к печати А.И. Ханчуком*

после доработки 19.04.2023 г.

принята к печати 03.07.2023 г.

***A.I. Malinovsky, A.A. Chashchin, V.V. Golozubov***

### **Source areas of terrigenous deposits of the Laeoling-Grodekovo terrane (western Primorye) according to mineralogical and geochemical data and results of U–Pb dating of detrital zircons**

The article looks at the results of a comprehensive study of the mineralogical composition of sandstones and U–Pb isotopic dating of detrital zircons from the Paleozoic–Early Mesozoic deposits of the Laeoling-Grodekovo terrane in western Primorye. Studies have shown that different aged sandstones of the terrane differ markedly in their mineralogical and geochemical parameters and, hence, they were derived from different sources. Sandstones of the Kordonka Formation are made up of fragments of basic and intermediate volcanic rocks of the oceanic island arc, as well as igneous and sedimentary rock assemblages of the oceanic island-arc basement. Eroded stable cratons and uplifted basement blocks which were crystalline basement inliers either flanked by rift zones or occurring along transform faults exerted a strong control on the accumulation of sandstones of the Reshetnikovka, Barabash and Mangugai formations. The main suppliers of detritus were acidic igneous rocks with minor inputs from ancient sedimentary rocks. It may well be that the edges of rifts and the eroded encialic arc provided clastic material for the rocks of the Talma Formation. The U–Pb geochronological studies on detrital zircons made it possible to constrain the age and possible position of the igneous complexes that supplied clastic material to the sedimentary basins of the terrane. Sandstones were found to contain detrital zircons with concordant ages from 2553 to 205 Ma, with Paleozoic zircons forming several age groups being dominant. Zircons of Precambrian and Triassic ages are far fewer. In general, the revealed age ranges of detrital zircons from sandstones of the Laeoling-Grodekovo terrane agree fairly well with the known stages of granitoid magmatism manifestations in the eastern part of the Central Asian fold belt.

**Key words:** Silurian, Permian, Triassic, source areas, Laeoling-Grodekovo terrane, detrital zircons, U–Pb isotopic age.