

УДК 550.93:552.51:551.72(571.53/.55)

## ВОЗРАСТ И ИСТОЧНИКИ ВЕЩЕСТВА ПОЗДНЕДОКЕМБРИЙСКИХ ОСАДОЧНЫХ ТОЛЩ ЮЖНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ: РЕЗУЛЬТАТЫ U–Pb(LA–ICP–MS) ДАТИРОВАНИЯ ДЕТРИТОВЫХ ЦИРКОНОВ

© 2013 г. Д. П. Гладкочуб, Г. Николь, А. М. Станевич, А. М. Мазукабзов,  
член-корреспондент РАН Е. В. Скляр, С. А. Писаревский, Т. В. Донская, Дж. Тайт

Поступило 28.01.2013 г.

DOI: 10.7868/S0869565213140181

Вопрос о времени и особенностях накопления осадочных толщ позднего докембрия на территории южного Прибайкалья – предмет многолетних дискуссий [1]. Ключевыми стратоподразделениями в контексте данной проблемы являются байкальская серия и ушаковская свита. Большинство исследователей разделяют гипотезу о том, что накопление этих осадочных толщ происходило в пределах Палеоазиатского океана, омывавшего южную окраину Сибирского кратона в позднем докембрии – раннем палеозое. До настоящего времени не существует консенсуса в вопросе о возрасте и источниках детритового материала рассматриваемых осадочных образований [1]. С целью приблизиться к решению обозначенных выше вопросов было проведено опробование песчаников из опорного разреза осадочных толщ позднего докембрия для изучения возраста содержащихся в этих терригенных породах детритовых цирконов. Разрез расположен в бассейне р. Куртун (западное Прибайкалье) (рис. 1).

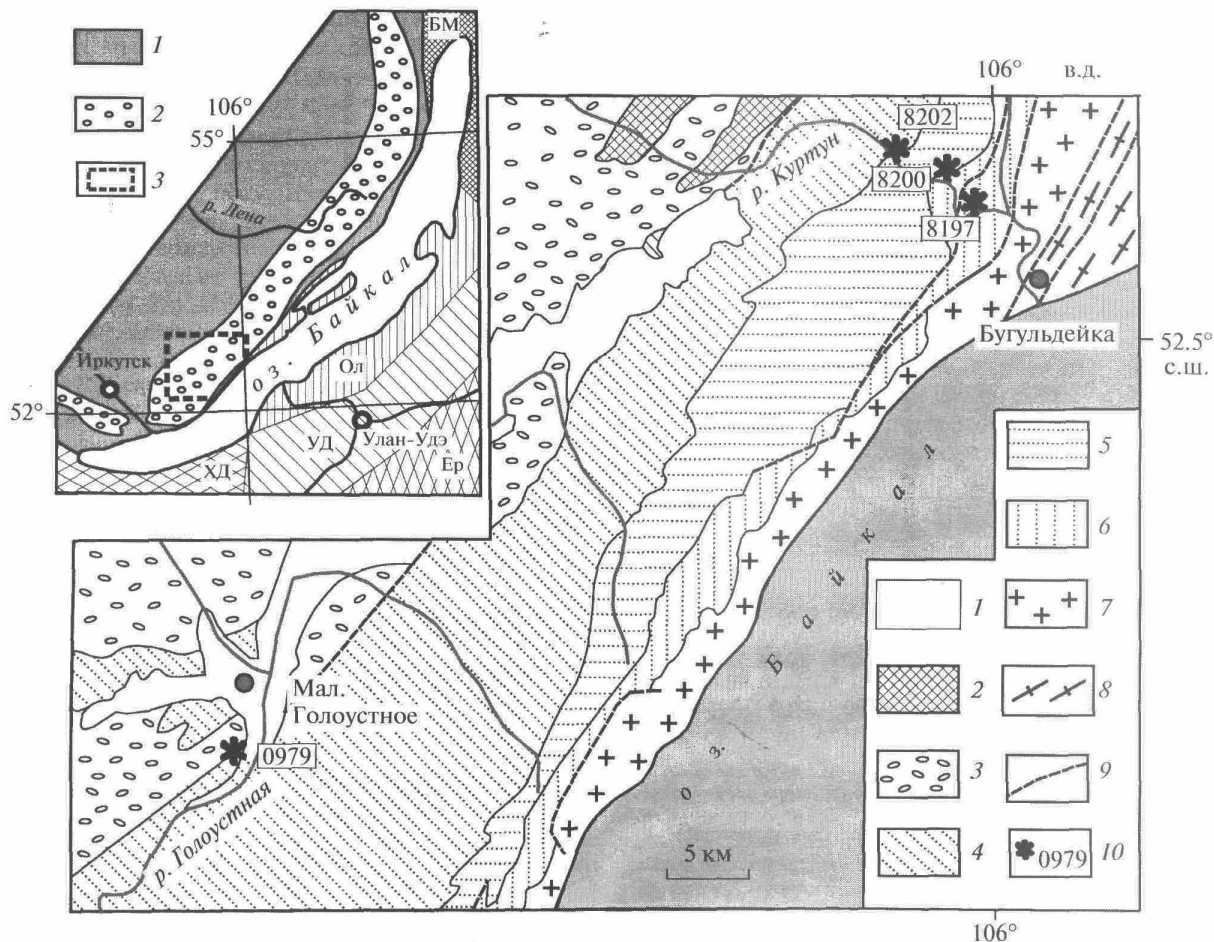
Изученный разрез [2] представлен (снизу вверх) голоустенской, улунтуйской и качергатской свитами байкальской серии и вышележающими породами ушаковской свиты. Нижняя часть голоустенской свиты представлена мелководными хемобиогенными карбонатами и кварцевыми песчаниками разной степени зрелости. Верхняя часть свиты сложена углеродсодержащими известняками и алевропелитами. Выше по разрезу отложения голоустенской свиты сменяются алевропесчаника-

ми нижней подсвиты улунтуйской свиты. Верхняя подсвита представлена преимущественно строматолитовыми и микрофитолитовыми карбонатами. Песчаники нижней подсвиты качергатской свиты резко сменяют биогермные карбонаты улунтуйской свиты и содержат их обломки. Для верхних пачек свиты характерны углеродистые алевропелиты. В полимиктовых конгломератах и песчаниках нижней части ушаковской свиты, которые перекрывают отложения качергатской свиты, присутствуют малоокатанные обломки микрофитолитовых известняков. Отложения верхней части ушаковской свиты наряду с пелитовым материалом содержат песчаники аркозового и полимиктового состава.

Пробы для изучения возраста детритовых цирконов были отобраны из нижних слоев голоустенской, улунтуйской, качергатской и ушаковской свит. Цирконы для изотопного датирования выделяли из образцов, вес каждого из которых составлял не менее 5–7 кг. После выделения тяжелой фракции на сепарационном столике из каждой пробы вручную (под биноклем) отбирали зерна циркона (не менее 100). Цирконы погружали в шайбу стандартного размера, которую наполняли эпоксидной смолой и после застывания смолы подвергали полировке. При анализе проводили измерение изотопных отношений в цирконах из различных групп без их предварительного отбора по размеру или морфологии. Из каждой пробы было проанализировано 87 цирконов, т.е. то количество зерен, которое позволяет выявить даже слабо представленные возрастные группы [3].

Возраст цирконов определяли методом LA–ICP–MS (Thermo-Finnigan Element II ICP–MS с приставкой New Wave UP193HE и эксимерным лазером) в Институте минералогии Университета г. Мюнстер (Германия). Измерения проводили со стандартом GJ-1. В расчеты при необходимости вводили поправку на обыкновенный Pb [4]. Зна-

*Институт земной коры  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Иркутск  
NEFTEx, Oxford, Abingdon, UK  
The University of Western Australia, Crawley, Australia  
Curtin University, Perth, Australia  
The University of Edinburgh, UK*



**Рис. 1.** Схема геологического строения бассейна рек Голоустная–Куртун. 1 – кайнозойские образования; 2 – образования, переходные от венда к кембрию; 3–6 – неопротерозойские образования: 3 – ушаковская свита (венд), 4–6 – свиты байкальской серии: 4 – качергатская, 5 – улунтуйская, 6 – голоустенская; 7 – гранитоиды раннего протерозоя (приморский комплекс); 8 – метаморфические и магматические образования венда и раннего палеозоя Ольхонского террейна; 9 – разломы; 10 – участки отбора проб и их номера.

На врезке схема основных структур южного Прибайкалья. 1 – Сибирский кратон. В пределах Саяно-Байкальской складчатой области разной штриховкой изображены фрагменты неопротерозойско-раннепалеозойских террейнов (ХД – Хамарлабанский, Ол – Ольхонский, БМ – Байкало-Муйский, Ер – Еравнинский, УД – Удино-Витимский); 2 – выходы на поверхность неопротерозойских образований; 3 – контур района работ.

чения  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  и  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  контролировали в ходе измерений, чтобы исключить аномальные параметры, связанные с попаданием в область измерений включений, а также участков зерен с повышенными значениями обыкновенного Pb или фрагментов зерен, обладающих разной возрастной зональностью. Полученные значения  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  были рассчитаны из  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  и  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  при допустимой величине  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U} = 137.88$ . Все ошибки приведены на уровне  $2\sigma$ . 274 циркона из проанализированных 348 зерен показали конкордантность на уровне  $\pm 10\%$ .

В ходе проведенных исследований были проанализированы детритовые цирконы трех образцов песчаников, отобранных из разреза байкаль-

ской серии – 8197 (голоустенская свита), обр. 8200 (улунтуйская свита), обр. 8202 (качергатская свита), и цирконы обр. 0979, отобранного из разреза ушаковской свиты.

Из разреза голоустенской свиты был отобран слабokatаклазирванный кварцевый песчаник (обр. 8197). Судя по реликтовым обломкам кварца, исходная структура песчаника обусловлена плохой гранулометрической сортировкой обломочного материала. Кроме кварца, в породе присутствуют зерна полевого шпата и кремни.

75 из 87 проанализированных цирконов (86%), выделенных из данного образца, показали конкордантные значения  $^{207}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}$ -возраста. Большинство из полученных датировок (57 значений) обра-

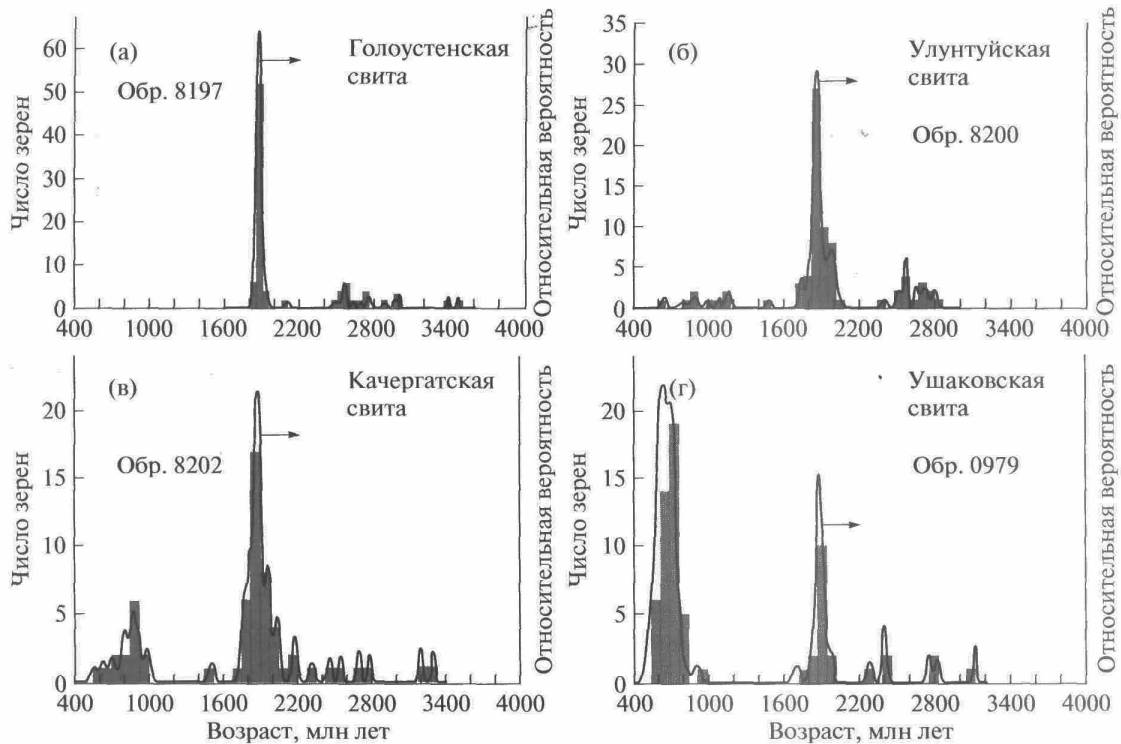


Рис. 2. U—Pb (<1 млрд лет) Pb—Pb (>1 млрд лет) гистограмма и кривая относительной вероятности возрастов детритовых цирконов из позднедокембрийских осадочных пород южной части Сибирского кратона (байкальская серия и ушаковская свита).

зуют основной пик с возрастом  $1865 \pm 4$  млн лет (рис. 2а). При этом возрасты единичных зерен позволяют наметить нижнее возрастное ограничение данной группы цирконов на уровне около 2.1 млрд лет ( $2096 \pm 34$  млн лет). Интересно отметить, что в промежуток между 2.1 и 2.5 млрд лет (начало следующей возрастной группы) не попадает ни одной конкордантной датировки. Полученные значения возраста достаточно представительной группы цирконов (14 зерен) заполняют интервал 2.5–3.0 млрд лет. Наиболее древние цирконы в рассматриваемом образце имеют мезоархейский возраст ( $3388 \pm 17$  и  $3466 \pm 19$  млн лет). При этом интервал 3.0–3.4 млрд лет полностью стерил в отношении присутствия детритовых цирконов. Вся совокупность полученных датировок может быть охарактеризована как “типично южно-сибирская”, т.е. характерная для пород фундамента южной части Сибирского кратона [5, 6].

Из разреза улунтуйской свиты был опробован алевролит (обр. 8200). Общая слоисто-сланцевая текстура породы подчеркивается линзовидно-полосчатыми обособлениями обломков кварца и полевых шпатов, сцементированных кальцитом. В небольшом количестве среди обломочного ма-

териала отмечаются чешуйки мусковита, циркон и обломки турмалина (до 0.03 мм).

По 74 из 87 проанализированных зерен (85%) были получены конкордантные значения возраста. Основной пик датировок отвечает значению  $1863 \pm 7$  млн лет (28 зерен). 14 проанализированных цирконов образуют группу, выполняющую возрастную интервал 2.4–2.8 млрд лет (рис. 2б). Возраст наиболее древнего циркона в исследованном образце составляет  $2814 \pm 38$  млн лет. Как и в рассмотренном выше обр. 8197, отчетливо выделяется интервал 2.4–2.1 млрд лет, не охарактеризованный детритовыми цирконами. Пять цирконов имеют мезопротерозойский возраст. Шесть относительно молодых цирконов отвечают интервалу ~971–631 млн лет. Конкордантное значение возраста, полученное по наиболее молодому циркону ( $631 \pm 20$  млн лет), позволяет говорить об эдиакарском возрасте накопления отложений улунтуйской свиты.

Из разреза качергатской свиты был отобран мелко-среднезернистый песчаник с карбонатно-глинистым цементом (обр. 8202). Угловатые, реже полуокатанные, обломки представлены в основном кварцем. Зерна кварца слегка деформированы, трещиноваты, имеют волнистое погасание. Обломки полевых шпатов пелитизированы,

сосюритизированы, трещиноваты. Фрагменты чешуек мусковита деформированы, имеют волнистое погасание. Акцессорные циркон и турмалин имеют размеры 0.18 и 0.3 мм соответственно.

Для 59 из 87 проанализированных зерен (68%) были получены конкордантные значения возраста. В отличие от рассмотренных выше песчаников голоуспенской и улунтуйской свит, изученный образец характеризуется отчетливо “бимодальным” типом распределения датировок детритовых цирконов (рис. 2в). При этом отмечено преобладание среди проанализированных зерен цирконов с позднедокембрийскими возрастами (основной пик). Конкордантное значение возраста, рассчитанного для палеопротерозойского пика (18 зерен), составляет  $1885 \pm 17$  млн лет. Второй по значимости пик возрастов, полученных по цирконам, отвечает значению  $933 \pm 24$  млн лет. В обр. 8202, как и в песчанике из разреза голоуспенской свиты (обр. 8197), вновь появляются цирконы с палеоархейскими возрастами (~3.3–3.2 млрд лет), а также прослеживаются два интервала (мезоархейский и мезопротерозойский), не охарактеризованные детритовыми цирконами. Четыре циркона демонстрируют неоархейский (2.8–2.5 млрд лет) возраст. Возраст пятнадцати цирконов отвечает интервалу 2.1–1.9 млрд лет. Два единичных циркона с возрастом 2.3 и 1.5 млрд лет, обнаруженные в исследованном образце, заслуживают упоминания без специального рассмотрения в силу их низкой статистической значимости. Неопротерозойский интервал практически полностью заполнен датировками детритовых цирконов (14 значений). U–Pb-возраст наиболее молодых цирконов ( $630 \pm 22$  и  $545 \pm 18$  млн лет) ограничивает верхний предел накопления осадков качергатской свиты эдиакарием. Достоверность минимального значения возраста, полученного по циркону этой свиты ( $545 \pm 18$  млн лет), вызывает определенные сомнения, так как противоречит геологической ситуации в регионе. Согласно региональным схемам стратиграфических корреляций, фаунистически охарактеризованные отложения нижнего кембрия располагаются значительно выше по разрезу [7].

Из разреза ушаковской свиты был отобран образец (обр. 0979), мелко-среднезернистого песчаника, сложенного неокатанными (90%) и полукатанными (10%) обломками. В составе пород преобладают обломки полевых шпатов, которые интенсивно серицитизированы, хлоритизированы и карбонатизированы. Кварцевые обломки имеют пластинчатую форму. В породе присутствуют фрагменты чешуек биотита, роговой обманки, рудного минерала. Акцессорные минералы представлены, кроме сфена, призматическими зернами циркона до 0.12 мм, а также осколками ортита аналогичной величины. Обломки пород представлены девитрифицированным стеклом основного

и среднего составов, андезитовыми порфиритами, метааргиллитами и гранитоидами.

Из 87 проанализированных цирконов 66 зерен показали конкордантные значения (76%). Как и в песчанике качергатской свиты, в изученном образце отчетливо выделяется два пика датировок, полученных по детритовым цирконам – палео- ( $1878 \pm 17$  млн лет, по 13 зернам) и неопротерозойский ( $699 \pm 14$  млн лет, рассчитанный по 12 зернам циркона), а также мезопротерозойский интервал, совершенно не охарактеризованный детритовыми цирконами (рис. 2г). При этом впервые для толщ, слагающих изученный разрез, “молодой” неопротерозойский пик датировок отчетливо преувеличивает над палеопротерозойским. В песчанике отмечены зерна архейского возраста ( $3121 \pm 27$ ,  $2818 \pm 43$ ,  $2753 \pm 37$  млн лет), типичные для пород фундамента кратона.

Как и в случае с минимальным значением возраста циркона из качергатской свиты, достоверность конкордантного значения наиболее молодого циркона из ушаковской свиты ( $532 \pm 14$  млн лет) вызывает сомнения. Более приемлемым является рассмотрение средневзвешенного значения возраста, рассчитанного по группе самых молодых цирконов ушаковской свиты (7 зерен) и составляющего  $554 \pm 12$  млн лет, что вполне согласуется с геологическими построениями.

Полученные геохронологические данные позволяют высказать некоторые соображения об источниках обломочного материала и о возможной возрастной позиции каждой изученной свиты.

Детритовый материал, обнаруженный в песчанике голоуспенской свиты, полностью отражает возраст основных корообразующих событий, проявленных в фундаменте Сибирского кратона. Эта особенность кардинально отличает терригенные образования голоуспенской свиты от аналогичных пород более молодых свит байкальской серии, имеющих в тяжелой фракции цирконы с “несибирскими” (в основном неопротерозойскими) возрастными характеристиками. Отмеченный контраст может быть объяснен резкой сменой условий седиментации, произошедшей после накопления пород голоуспенской свиты. Столь кардинальная смена источников сноса, вероятно, не могла произойти относительно быстро в масштабах геологического времени, что ставит вопрос о продолжительности перерыва, разделяющего голоуспенскую и улунтуйскую свиты байкальской серии. Учитывая непосредственное залегание базальных слоев голоуспенской свиты на палеопротерозойских гранитах приморского комплекса и вулканах акитканской серии, поставщиком терригенного материала свиты можно считать, прежде всего, образования указанных комплексов и частично более древние породы фундамента кратона.

Песчаники и алевролиты улунтуйской свиты, по приведенным данным, резко контрастируют с ниже- (голоустенская) и выше- (качергатская) залегающими терригенными образованиями. Наряду с появлением в обломочном материале цирконов с неопротерозойскими возрастами в обр. 8200 отмечены единичные цирконы, демонстрирующие мезопротерозойские конкордантные значения  $^{207}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}$ -возраста ( $1521 \pm 48$ ,  $1486 \pm 42$ ,  $1207 \pm 51$ ,  $1165 \pm 49$ ,  $1159 \pm 43$  млн лет). Появление этих нетипичных для южного фланга Сибирского кратона мезопротерозойских цирконов может быть объяснено сносом детритового материала с разнородных террейнов, мигрировавших в пределах открывшегося Палеоазиатского океана. Кандидатами на роль источников сноса обломочного материала с подобными возрастными характеристиками, а также отдельных цирконов с неопротерозойскими (878–631 млн лет) возрастными могут служить Тувино-Монгольский [8] и Дзобханский [9] микроконтиненты.

Для песчаника качергатской свиты фиксируется резкая смена источников сноса относительно пород улунтуйской свиты. Среди детритов полностью отсутствуют цирконы с мезопротерозойскими возрастными, что позволяет предположить возможное удаление от области седиментации Тувино-Монгольского и Дзобханского микроконтинентов, вероятно, сместившихся к югу (в современных координатах). Значительно большее количество неопротерозойского материала и характер возрастных спектров цирконов (958–630 млн лет) позволяют рассматривать Икатский [10] и Хамардабан-Ольхонский [11] террейны наряду с комплексами пород Байкало-Муйского пояса (обзор в [12]) в качестве возможных источников обломочного материала в бассейне седиментации песчаников качергатской серии. Важно отметить, что именно эти террейны непосредственно прилегают в структуре Центрально-Азиатского складчатого пояса к областям развития пород байкальской серии.

Спектры возрастов детритовых цирконов песчаника ушаковской свиты практически полностью идентичны таковым, установленным для песчаников качергатской свиты. Различие заключается лишь в пропорциях древнего (архей–палеопротерозойского) и молодого (неопротерозойского) обломочного материала в осадках. Если в песчанике качергатской свиты доля позднекембрийских цирконов составляет около одной четверти от проанализированных, то в песчанике ушаковской свиты “молодых” цирконов уже более двух третей. Столь существенное увеличение в осадке количества неопротерозойских и эдиакарских цирконов может отражать значительно воз-

росший вклад в бассейн седиментации обломочного материала, поступавшего с упомянутых выше террейнов. Эти террейны на фоне закрытия рассматриваемого сегмента Палеоазиатского океана сближались с южной окраиной Сибирского кратона, с формированием бассейна форланда [1, 13]. Окончательная аккреция их с кратоном произошла в позднем кембрии–раннем ордовике (500–470 млн лет) [14]. В целом результаты изотопного датирования детритовых цирконов позволяют уверенно ограничить верхний возрастной рубеж накопления осадочных пород байкальской серии и ушаковской свиты поздним эдиакарием (поздним вендом).

Исследования выполнены при поддержке Программы фундаментальных исследований РАН № 10 (Проект 10.3), ФЦПК (ГК 02.740.11.0721), гранта РФФИ № 13–05–00048 и гранта Marie Curie Европейского сообщества.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Станевич А.М., Мазукабзов А.М., Постников А.А. и др. // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 1. С. 60–79.
2. Мазукабзов А.М., Станевич А.М., Постников А.А. и др. // ДАН. 2001. Т. 378. № 3. С. 370–374.
3. Vermeesch P. // Earth and Planet. Sci. Lett. 2004. V. 224. № 3/4. P. 441–451.
4. Stacey J.S., Kramers J.D. // Earth and Planet. Sci. Lett. 1975. V. 26. № 2. P. 207–221.
5. Poller U., Gladkochub D., Donskaya T., et al. // Precamb. Res. 2005. V. 136. P. 353–368.
6. Rojas-Agramonte Y., Kröner A., Demoux A., et al. // Gondwana Res. 2011. V. 19. № 3. P. 751–763.
7. Решения Всесоюзного стратиграфического совещания по докембрию, палеозою и четвертичной системе Средней Сибири. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1983. 215 с.
8. Козаков И.К., Сальникова Е.Б., Натман А. и др. // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2005. Т. 13. № 1. С. 3–25.
9. Demoux A., Kröner A., Badarch G., et al. // J. Geol. 2009. V. 117. № 4. P. 377–397.
10. Руженцев С.В., Аристов В.А., Минина О.Р. и др. // ДАН. 2007. Т. 417. № 2. С. 225–228.
11. Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Wingate M.T.D., et al. // J. Geol. Soc. London. 2008. V. 165. P. 235–246.
12. Рыцк Е.Ю., Амелин Ю.В., Ризванова Н.Г. и др. // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2001. Т. 9. № 4. С. 3–15.
13. Немеров В.К., Станевич А.М. // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 3. С. 456–470.
14. Донская Т.В., Скляр Е.В., Гладкочуб Д.П. и др. // ДАН. 2000. Т. 374. № 1. С. 79–83.