

УДК 551.24 [311.231]+7/8+550.4:9

## ГРАНАТОВЫЕ ГРАНУЛИТЫ СРЕДНЕГО ТЕЧЕНИЯ р. СУТАМ (АЛДАНСКИЙ ЩИТ) КАК ВОЗМОЖНОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО МЕТАМОРФИЗОВАННОЙ И ТЕКТОНИЧЕСКИ ПЕРЕМЕЩЕННОЙ ПОСТГАДЕЙСКОЙ КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ

© 2017 г. М. З. Глуховский<sup>1</sup>, Т. Б. Баянова<sup>2</sup>, М. И. Кузьмин<sup>3</sup>, Л. М. Лялина<sup>2</sup>, Т. Ф. Щербакова<sup>1</sup><sup>1</sup>Геологический институт РАН, 109017, г. Москва, пер. Пыжевский, 7, e-mail: maratg31@yandex.ru<sup>2</sup>Геологический институт Кольского НЦ РАН, 184209, г. Апатиты, Мурманская обл., ул. Ферсмана, 14<sup>3</sup>Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а

Поступила в редакцию 31.01.2017 г.; принята к печати 11.04.2017 г.

В статье рассматривается проблема природы высокоглиноземистых гранатовых гранулитов р. Сутам (Алданский щит), в которых впервые в России было, помимо прочих зерен цирконов с U-Pb возрастом от 1.92 млрд лет, было выявлено зерно возрастом 3.94 млрд лет в целом (ID-TIMS). Этот возраст оценивается как верхний возрастной предел гадейской зона. Задачей исследования явились установление петрогенезиса гранатовых гранулитов, появление в их составе циркона гадея и механизма инъекционного диапиризма тела гранатовых гранулитов в верхние горизонты коры с ее глубоких уровней. Сравнение геохимии гранатовых гранулитов и средней коры показало, что первые обогащены всем спектром редкоземельных элементов (кроме Eu), а также Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, U, Th и обеднены Na, Ca и Sr – наиболее подвижными элементами. Это, в сочетании с другими геохимическими показателями, послужило основанием версии о протолите гранулитов, как о верхней части аллитной зоны выветривания средней коры, образованной в условиях аридного климата. Зерно циркона гадея рассматривается как захваченное из гранитов средней коры. Диапиризм гранатовых гранулитов (с захваченным цирконом гадея) осуществлялся в ходе процессов палеопротерозойского термотектогенеза Алданского щита, которые сопровождалась горизонтальной пропацией глубинных гранит-анортозитовых тектонических потоков от центра плюма к его периферии. В ходе движения этих потоков фрагменты нижней и средней коры, включая зону ее выветривания, разрушались и перемещались как по латерали, так и вертикально. В последнем случае они дискретно и под большим давлением были внедрены в верхнюю гранитогайсовую кору (1.83–1.82 млрд лет). Циркон возрастом 3.94 млрд лет сопоставим с цирконами гадея ортогнейсов района Акаста (Канадский щит, 4.03–3.94 млрд лет, SHRIMP и ID-TIMS).

**Ключевые слова:** Алданский щит, гранатовые гранулиты, средняя кора, выветривание, сравнительные геохимия, петрогенезис, геохронология, тектоника

## GARNET GRANULITES OF SUTAM RIVER MIDDLE CURRENT SUTAM RIVER (ALDAN SHIELD) AS POSSIBLE INDICATORS OF METAMORPHOSED AND TECTONICALLY DISPLACED POST-HADEAN WEATHERING CRUST

Marat Z. Glukhovskii<sup>1</sup>, Tatyana B. Bayanova<sup>2</sup>, Mikhail I. Kuz'min<sup>3</sup>, Lyudmila M. Lyalina<sup>2</sup>,  
Tamara F. Shcherbakova<sup>1</sup><sup>1</sup>Geological institute of RAS, 7 Pyzhevsky ln., Moscow, 109017, Russia, e-mail: maratg31@yandex.ru<sup>2</sup>Geological institute, Kola Science Centre of RAS, Apatity, Murmansk region, 184209, Russia<sup>3</sup>A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of RAS, 1a Favorsky st., Irkutsk, 664033, Russia

Received 31.01.2017; accepted 11.04.2017

The article discusses the problem of the nature of high-alumina garnet granulites from Sutam River (Aldan Shield). The studies revealed that the majority of detrital grains have U-Pb age of up to 1.92 Ga; however the zircon grain of 3.94 Ga has been for the first time discovered in Russia. This age is estimated as the upper limit of the Hadean eon. The goals of the present studies were to reveal the petrogenesis of garnet granulites and to find out the origin of the Hadean zircon in these garnet granulites and the mechanisms of injection diapirism of garnet granulite body to the upper horizons of the crust. The comparison of garnet granulites and middle crust showed that the granulites are enriched in the whole spectrum of rare earth

**Для цитирования:** Глуховский М.З., Баянова Т.Б., Кузьмин М.И., Лялина Л.М., Щербакова Т.Ф. (2017) Гранатовые гранулиты среднего течения р. Сутам (Алданский щит) как возможное свидетельство метаморфизованной и тектонически перемещенной постгадейской коры выветривания. *Литосфера*, 17(6), 5-22. DOI: 10.24930/1681-9004-2017-6-005-022

**For citation:** Glukhovskii M.Z., Bayanova T.B., Kuz'min M.I., Lyalina L.M., Shcherbakova T.F. (2017) Garnet granulites of Sutam River middle current (Aldan Shield) as possible indicators of metamorphosed and tectonically displaced Post-Hadean weathering crust. *Litosfera*, 17(6), 5-22. DOI: 10.24930/1681-9004-2017-6-005-022

elements (except of Eu) as well as  $Al_2O_3$ , U, Th and are depleted in Na, Ca и Sr (the most mobile elements). This in combination with other geochemical indicators suggested the granulite protolith as an upper part of the allite zone of middle crust weathering, formed in arid climate. The Hadean zircon grain is regarded as having been captured from the granites of middle crust. The diapirism of garnet granulites (with the captured Hadean zircon) proceeded during the Paleoproterozoic thermotectogenesis of the Aldan shield which were accompanied by the horizontal propagation of deep-seated granite-anorthosite tectonic flows from the plume's center to its periphery. During the movement of these flows the fragments of the lower and middle crust were shifted both laterally and vertically. When they moved vertically they were discretely intruded in the upper granite-gneiss crust (1.83–1.82 Ga) under high pressure. The 3.94 Ga zircon is comparable with the Hadean zircons from Acasta orthogneiss (Canadian shield, 4.03–3.94 Ga, SHRIMP and ID-TIMS).

**Keywords:** Aldan shield, garnet granulites, middle crust, weathering, comparative geochemistry, petrogenesis, geochronology, tectonics

#### Acknowledgements

The authors are grateful to S.P. Korikovskii and V.I. Mokrygina for scientific advice and valuable councils, as well as to A.V. Goreglyad, D.B. Gorbатов, N.V. Levkovich, E.V. Makarova, and L.F. Sergachyova for her help in conducting analytical work and in the preparation of the article.

## ВВЕДЕНИЕ

Настоящее исследование посвящено решению вопросов природы гранатовых гранулитов, которые обнажаются в скальном обрыве на правом берегу среднего течения р. Сутам и содержат зерно циркона гадейского эона – 3.94 млрд лет. Оно осуществляется путем изучения геологии, геохронологии и механизмов, определивших появление этих пород в верхних горизонтах коры в виде инъекционного диапира, с привлечением методов сравнительной геохимии (средняя кора) и особенностей ротационно-плюмовой тектоники Алданского щита.

Этот район южной части щита относится к Сутамскому блоку. Его протяженность – 180 км, ширина – 120 км. Он занимает большую часть ранее описанного Гонамского эндербитового купола [Глуховский, Моралёв 2001], ограниченного со всех сторон палеозой-мезозойскими грабенами, а с юга – Становым разломом (рис. 1, 2).

Протяженность скального выхода гранулитов около 10–15 м при высоте скалы 3–5 м и ширине не более 2.0–2.5 м. Остальную массу этих пород перекрывают аллювиальные и аллювиально-делювиальные отложения.

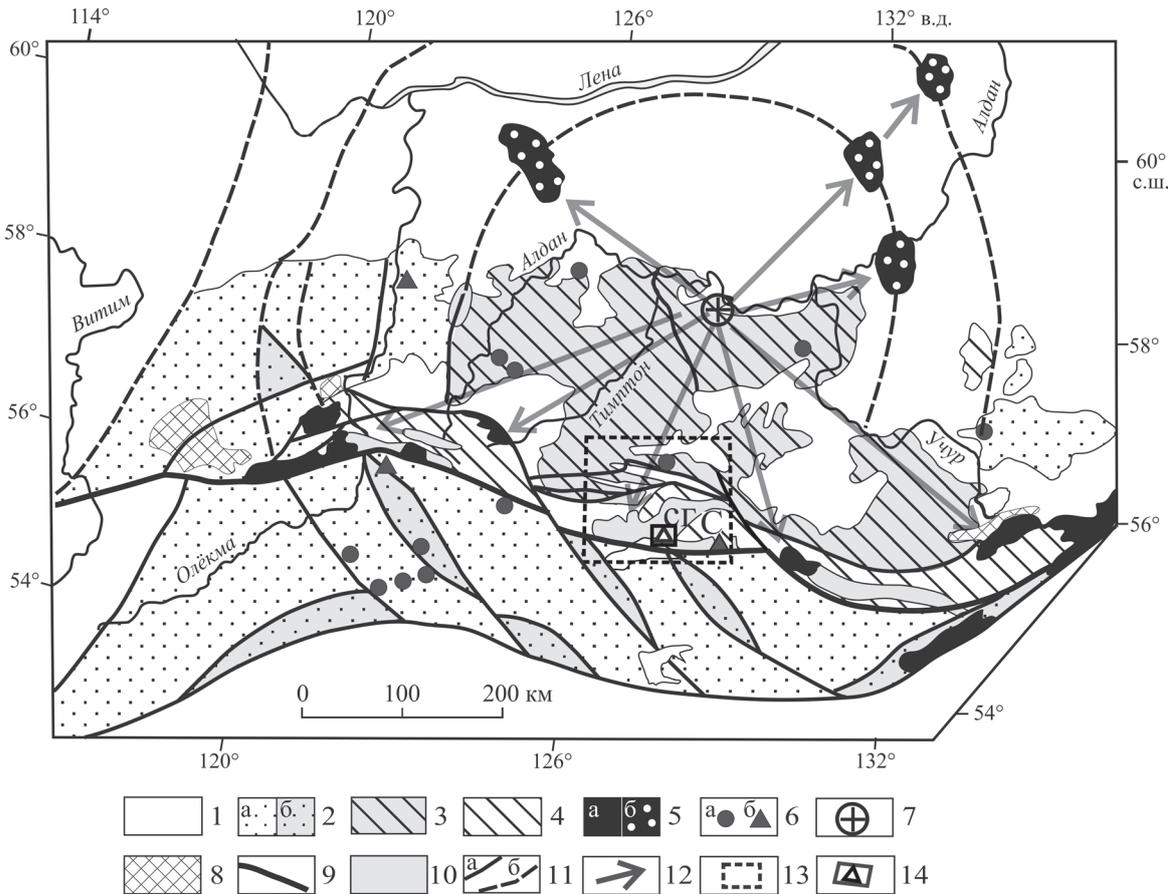
Гранулиты отличаются своей массивной (плотность 3.55 г/см<sup>3</sup>) и крупнозернистой пятнистой текстурой за счет неориентированных зерен граната размером от нескольких мм до 5 см и более (рис. 3), а также высокой степенью метаморфизма: 1.8–1.1 ГПа и 750°C [Кострыкина, 1976а, б]. На космических снимках системы “Google Earth” видно, что эти гранулиты слагают в плане изометричное тело, которое интерпретируется как инъекционный диапир диаметром около 350 м (рис. 4). Из гранатовых гранулитов было отобрано 25 кг штучных проб, разделенных на две равные части. Одна из них была направлена на геохимические анализы, выполненные в лаборатории Института геохимии имени А.П. Виноградова СО РАН на приборе “Element-2”.

Другая часть проб была передана в Лабораторию геохронологии и изотопной геохимии Геологического института КНЦ РАН. Геохронологические исследования U-Pb возраста цирконов и титанита осуществлялись по методу ID-TIMS с использованием <sup>205</sup>Pb на семиканальном масс-спектрометре FINNIGAN-MAT-262 (RPQ).

### КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ СУТАМСКОГО БЛОКА И ПОЛОЖЕНИЯ ГРАНАТОВЫХ ГРАНУЛИТОВ

В своих исследованиях мы опираемся на представления о том, что все структурно-вещественные комплексы Алданского щита формировались в плюм-тектоническом режиме, в результате чего в раннем архее в интервале 3.6–3.3 млрд лет образовалось Алдано-Становое сиалическое ядро (нуклеар) диаметром 1100 км [Глуховский, 1990]. Важнейшая роль в тектономагматическом развитии Алданского щита принадлежала процессам палеопротерозойского андерплейтинга и связанного с ним термотектогенеза (2.8–1.9 млрд лет), которые были вызваны возрождением Алданского плюма в условиях быстрого вращения Земли [Глуховский, 2009]. Этот ротационно-плюмовый режим сопровождался как прогрессивным, так и регрессивным региональным метаморфизмом пород, куполообразованием, а также формированием масштабной кольцевой тектонически разобщенной магматической системы анортозитов и связанных с ними гранитов (см. рис. 1).

В районе Сутамского блока выделяют два структурно-вещественных комплекса, Это нестратифицируемый инфракрустальный комплекс, представленный породами эндербит-чарнокитовой серии ГТГ с включениями метабазитов и стратифицируемый супракрустальный комплекс, сложенный в основном парапородами сутамской толщи – мета-



**Рис. 1.** Схема тектонического районирования Алданского щита с элементами кинематики ниже-среднекоровых тектонических потоков по [Глуховский и др., 2011].

1 – нерасчлененные образования фанерозоя; 2–4 – архейско-протерозойские структурно-метаморфические области: 2 – амфиболито-гнейсовая и гранит-зеленокаменная (а) с блоками пород гранулитовой фации метаморфизма (б); 3, 4 – гранулитогнейсовая: 3 – умеренных и повышенных *PT*-условий метаморфизма и 4 – сверхвысоких до умеренных давлений и температур; 5–8 – палеопротерозойские магматические образования: 5 – массивы автономных анортозитов: вскрытые (а) и погребенные (б) по [Стогний Г., Стогний В., 2005], 6 – малые тела анортозитов (а) и протрузии эцлогитов (б), 7 – гранодиориты массива Емеллели, 8 – граниты удоканского и урканского комплексов, ассоциирующие с анортозитами; 9 – Становой разлом; 10 – положительные гравитационные аномалии; 11 – разломы: установленные (а), предполагаемые, включая ареал развития аляскитовых гранитов (б); 12 – направления движения ниже-среднекоровых тектонических потоков; 13 – контур рис. 2; 14 – место коренного залегания гранулитов и контур рис. 4. Буквенные обозначения: С – Сутамский блок, СГ – Сутамский гравитационный максимум.

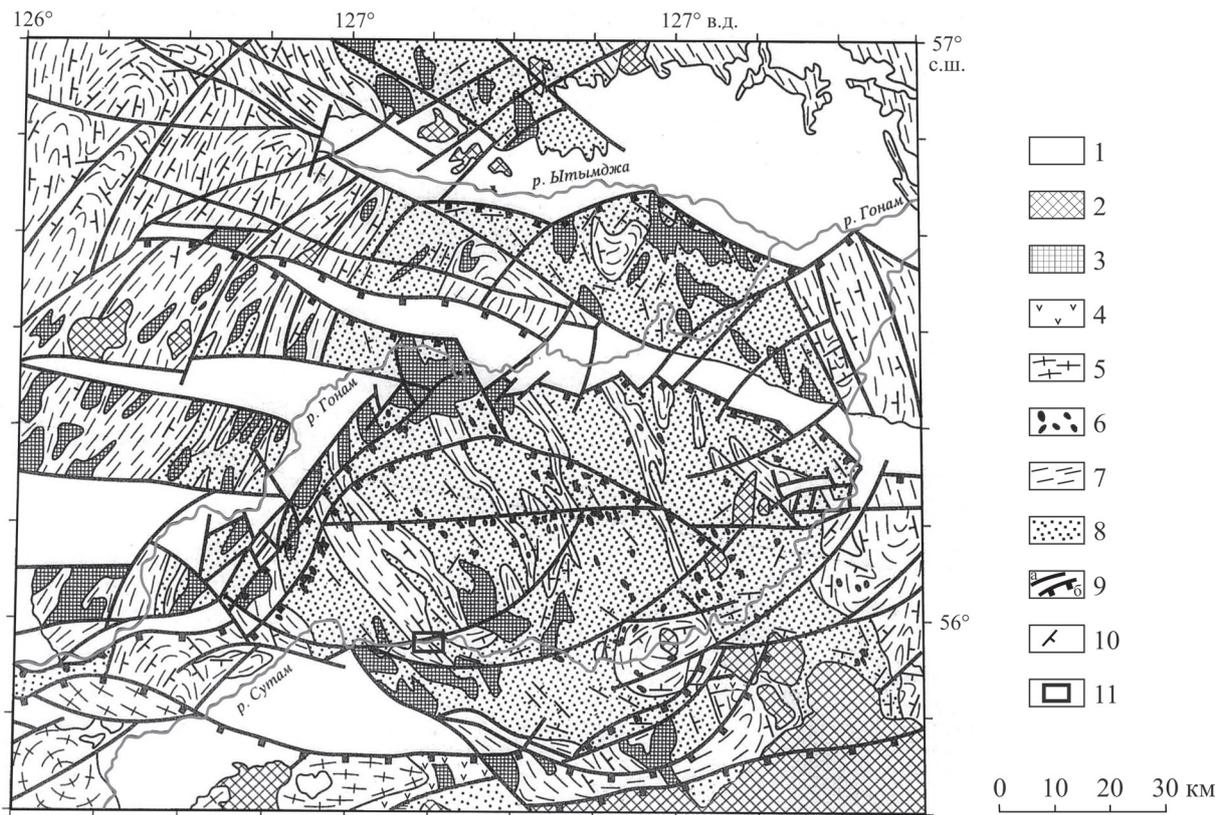
**Fig. 1.** Scheme of the tectonic zoning (Aldan shield) with the elements of kinematics of the lower-middle crust tectonic flows [Glukhovskii et al., 2011].

1 – Phanerozoic undivided formations; 2–4 – Archean-Proterozoic structural-metamorphic areas: 2 – amphibolite-gneiss and granite-greenstone (a) with blocks of rocks of granulite metamorphism facies (b); 3, 4 – granulite-gneiss: 3 – moderate and increased *PT*-conditions of metamorphism, 4 – super-high to moderate pressure and temperature; 5–8 – Paleoproterozoic magmatic formations: 5 – complexes of autonomous anorthosites: exposed (a) and buried (b) [Stognii G. and Stognii V., 2005], 6 – small bodies of anorthosites (a) and eclogite protrusions (b), 7 – Emelleli granodiorites; 8 – Udokan and Urkan granites, which are associated with anorthosites; 9 – Stanovoi fault; 10 – positive gravitational anomalies; 11 – faults: defined (a) and supposed, including the alaskite granite occurrences (b); 12 – directions of movements of lower-middle crust tectonic flows; 13 – outline of Fig. 2.; 14 – bedrock granulite occurrences and outline of Fig. 4. C – Sutam block, CG – Sutam gravitational maximum.

пелитами, кальцифирами, диопсид-скаполитовыми породами с прослоями metabazitov, линзами кварцитов, в том числе железистых [Котов и др., 1999; Глуховский, Моралев, 2001; Котов, 2003]. Оба комплекса, за некоторым исключением, метаморфизованы в палеопротерозое в условиях умеренной гра-

нулитовой фации и формируют сжатые и сублинейные складки с северо-западным простиранием осей.

Диопир гранатовых гранулитов прорывает породы серии ТТГ и частично супракрупального комплекса (см. рис. 4). Он располагается на южной



**Рис. 2.** Геолого-структурная схема Гонамского купола по [Глуховский, Моралёв, 2001].

1 – мезо-палеозойские нерасчлененные осадочно-вулканогенные отложения; 2 – юрско-меловые граниты; 3–5 – магматические породы палеопротерозоя: 3 – аляскитовые граниты, 4 – нерасчлененные анортозиты, габбро-анортозиты, габбро, 5 – древнестановые плагиогранитогайсы; 6–8 – магматические и метаморфические образования архея: 6 – метальтрабазиты (лерцолиты, дуниты, пироксениты, перидотиты); 7 – супракrustальный комплекс; 8 – инфракrustальный комплекс; 9 – разломы: крутопадающие (а) и надвиги (б); 10 – элементы залегания кристаллизационной сланцеватости в супракrustальном комплексе и гнейсовидности в эндербитах; 11 – контур рис. 4.

**Fig. 2.** Geologic-structural scheme of the Gonam dome [Glukhovskii, Moralev, 2001].

1 – Meso-Paleozoic undivided sedimentary-volcanogenic deposits; 2 – Jurassic-Cretaceous granites; 3–5 – Paleoproterozoic magmatic rocks: 3 – alaskite granites, 4 – undivided anorthosites, gabbro-anorthosites, gabbro, 5 – ancient plagiogranite gneisses; 6–8 – Archean magmatic and metamorphic formations: 6 – metaultrabasites (lherzolites, dunites, pyroxenites, peridotites); 7 – supracrustal complex; 8 – infracrustal complex; 9 – faults: steeply dipping (a) and thrusts (b); 10 – elements of crystallization schistosity in supracrustal complex and gnessosity in enderbites; 11 – outline of Fig. 4.

окраине ядра Гонамского эндербитового купола (см. рис. 1, 2), который отражен в аномальном магнитном поле кольцевой зональностью: с относительно пониженными значениями полного вектора магнитного поля ( $\Delta T_a$  от  $-5$  и менее до  $+2$  миллиэрстед) в центральной части и широкой внешней кольцевой зоной положительных значений  $\Delta T_a$  от  $2$  до  $10$  и более миллиэрстед; [Глуховский, Моралёв, 2001]. Кроме того, с этой структурой и ее окрестностями совпадает изометричный Сутамский гравитационный максимум с амплитудой до  $15$  мГал и глубиной  $6$ – $10$  км [Стогний Г., Стогний В., 2005]. Более узкая гравитационная зона протягивается за пределы Сутамского максимума в виде тонкой полосы к востоку и западу от него, где она совмещается

с Каларским массивом анортозитов (см. рис. 1). Возможной причиной магнитно-плотностных неоднородностей Гонамского купола могут служить особенности его глубинного строения и эволюции. В частности, его насыщенность мета- и ультрабазитами может быть связана с вероятным подъемом и активизацией нижней и средней кор. Это отразилось на относительно высокой средневзвешенной плотности района купола ( $2.9$  г/см<sup>3</sup>) по сравнению с сопредельными площадями ( $2.75$  г/см<sup>3</sup>) [Стогний Г., Стогний В., 2005], а также на изометричном строении аномального магнитного поля.

Гранатовые гранулиты ранее (под руководством А.А. Маракушева) детально изучались В.И. Кастрькиной [1976а, б]. Они состоят из грана-



Рис. 3. Фотография штуфа гранатового гранулита.

Fig. 3. Photo of garnet granulite sample.

та – пироп-альмандинового ряда (5–30%;  $F = 50.08$ ), силлиманита (15–40%), микроклина (3–5%), кварца (7–15%), биотита (7–15%) и плагиоклаза (18–25%) – андезина с 32–38%  $An$ , небольшого количество кордиерита, единичных зерен ортоклаза, кианита и графита. Эта парагенетическая ассоциация минералов типична для метаморфизма метапелитов гранулитовой фации [Кострыкина, 1976а, б; Кориковский, 1979], отвечающих условиям гранат-кордиеритовой субфации Сутамской фации гранулитовых комплексов [Маракушев, 1965; Кострыкина, 1976б].

Гранат представлен крупными (7–50 мм) изометричными или несколько вытянутыми по сланцеватости светло-розовыми трещиноватыми зернами (см. рис. 3) с включениями кварца, плагиоклаза и биотита, а также иголок силлиманита, которые располагаются субпараллельно в двух направлениях, пересекающихся под прямым углом. Некоторые зерна граната замещаются с краев силлиманитом вместе с плагиоклазом и биотитом.

Кордиерит очень редко образует относительно крупные кристаллы с малым количеством плеохроичных дворинок, в то время как силлиманит, иногда совместно с редким кианитом, образует прямоугольные, квадратные или ромбовидные кристаллы размером от 0.1 до 0.4–0.6 мм. Они группируются в агрегаты в виде полос шириной до 2.5 мм. Среди мелких зерен выделяются узкие тонкие призмы без концевых граней длиной до 2 мм, с характерными поперечными трещинами. Также имеются очень тонкие иголки, пронизывающие гранат, плагиоклаз и биотит.

Ортоклаз представлен изометричными зернами криптопертитового строения, которые располагаются среди зерен плагиоклаза или вблизи граната. У большинства зерен плагиоклаза двойники отсутствуют, за исключением некоторых крупных индивидов, у которых двойники наблюдаются только в их краевых частях, что свидетельствует о раскислении неравномерно сосюритизированного плагиоклаза, особенно на контакте с гранатом. Обнаружены и более мелкие “таблитчатые” зерна олигоклаза, (0.4–0.8 мм) и андезина с 18–20%  $An$  свежего облика. Они тонко полисинтетически сдвойникованы.

Микроклин встречается в виде мелких выделений, заполняющих пространства между зернами плагиоклаза. Он обладает не всегда четко выраженным решетчатым строением, слагая зерна изометричной или овальной формы размером 1.2–1.5, реже 3.0–2.5 мм, с мелко угловатыми неровными границами.

Кварц часто заполняет интерстиции между зернами других минералов, иногда образуя небольшие скопления вместе с мелкими зернами плагиоклаза или включения в гранате.

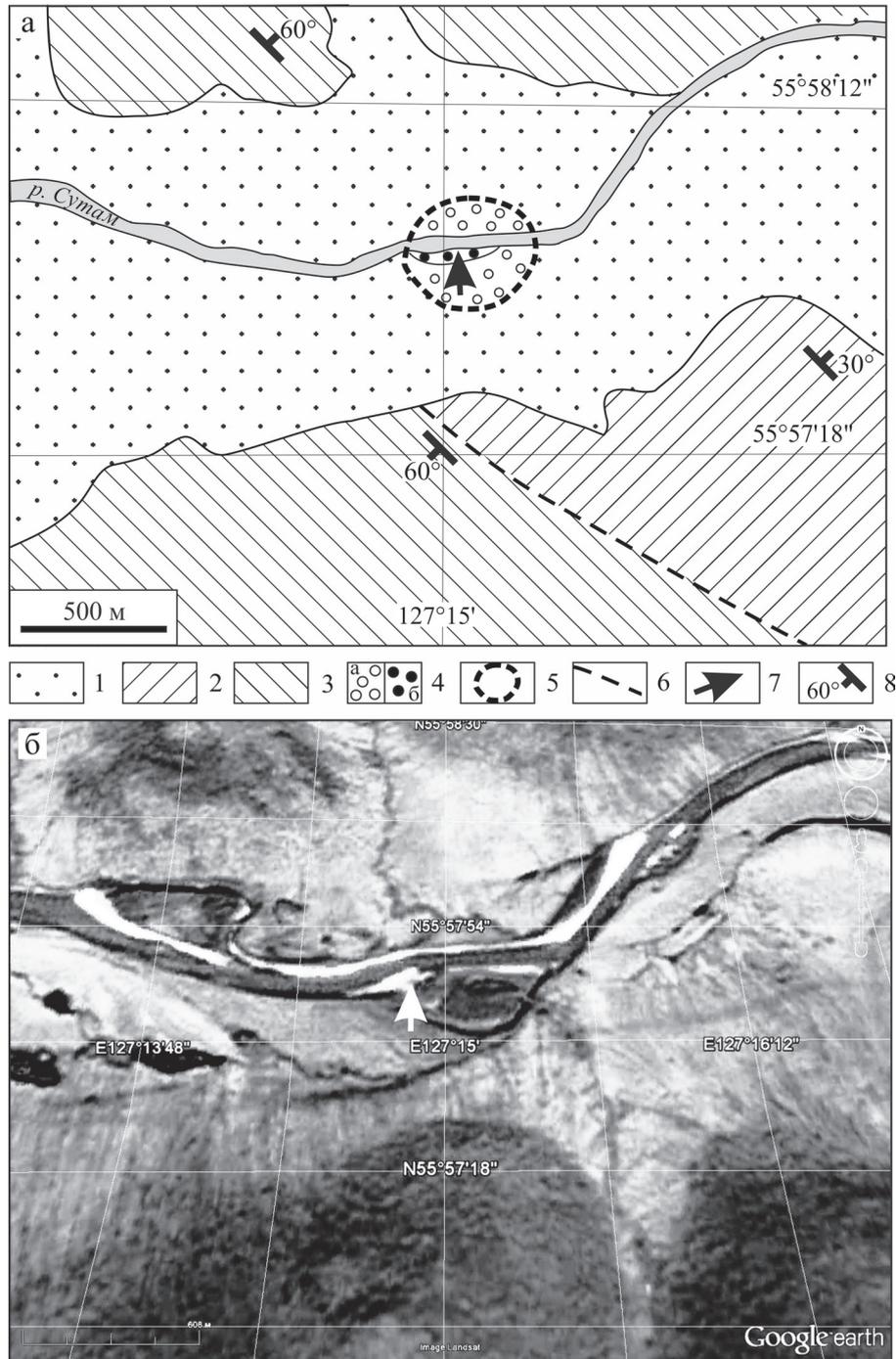
Биотит – ярко-бурый с красноватым оттенком (признак высокого содержания титана). Распределен неравномерно, образуя небольшие лейстовидные пластинки длиной 0.4–0.6 мм (редко до 1.5–2.0 мм) или выделения неправильной формы, местами собранные в пятнистые или неотчетливо полосовидные скопления. Часто ассоциирует с графитом.

Рудный минерал представлен единичными мелкими зернами титаномагнетита. Акцессорные минералы: шпинель, рутил и циркон (малакон).

Текстура породы порфиروبластовая, пятнисто-массивная, с неотчетливо выраженной полосчатостью и с лепидогранобластовой структурой основной массы.

Все окрестности тела гранатовых гранулитов, равно как и все обширное пространство Алданского сиалического ядра (см. рис. 1), пронизаны разновеликими телами палеопротерозойских кирпичнокрасных и белых аляскитовых гранитов (U-Pb-возраст цирконов – 1920–1901 млн лет) и их мигматитами [Глуховский, 2009]. Отдельное место занимают порфиробластические гранодиориты массива Емеллели на р. Алдан в центре щита (рис. 1) с цирконами U-Pb-возраста 2007 млн лет ( $T_{(DM)} = 2.88–2.57$  млрд лет и  $\epsilon_{Nd}(T) -9.22–5.34$ ). По спектру РЗЭ вся эта ассоциация гранитоидов комплементарна анортозитам Каларского массива и связана с ними парагенетически [Глуховский и др., 1993, 2011].

Породы Сутамского блока, особенно в полосе аномальной гравитационной зоны (см. рис. 1), характеризуются различными вариациями  $PT$ -условий гранулитового метаморфизма. Сводка работ по этой проблеме приведена в статье [Глухов-



**Рис. 4.** Схема геологического строения района коренного выхода гранатовых гранулитов (а) и изображение этого района на космическом снимке системы Google Earth (б).

1 – нерасчлененные рыхлые отложения склонов, долины и русла р. Сутам; 2, 3 – нерасчлененные образования: 2 – инфра-крупного и 3 – супра-крупного комплексов архея; 4 – гранатовые гранулиты: в обнажении (а) и перекрытые рыхлыми отложениями (б); 5 – граница “диапира” гранатовых гранулитов по данным дешифрирования; 6 – условная геологическая граница между комплексами архея; 7 – место отбора пробы; 8 – элементы залегания кристаллизационной сланцеватости метаморфических пород.

**Fig. 4.** Scheme of geologic structure of garnet granulite exposure (a) and space photo of the site by Google Earth (b).

1 – undivided loose sediments of slopes, valley and channel of Sutam River; 2, 3 – undivided formations: 2 – Archean infracrustal and 3 – supracrustal complexes; 4 – garnet granulites from the exposure (a) and buried by loose sediments (b); 5 – boundary of diapir of garnet granulites; 6 – conventional geologic boundary between the Archean complexes; 7 – sampling site; 8 – elements of crystallization schistosity of metamorphic rocks.

ский, Моралев, 2001]. Здесь обнаружены породы с *PT*-условиями метаморфизма от  $P = 1.3\text{--}1.4$  ГПа и  $T = 1100^\circ\text{C}$ , а также от  $P = 1.0\text{--}1.1$  ГПа и  $T = 980\text{--}1000^\circ\text{C}$  до  $P = 0.3\text{--}0.4$  ГПа и  $T = 550^\circ\text{C}$  [Маракушев, 1965; Кориковский, Кислякова, 1975; Кострыкина, 1976а, б; и др.]. Это может быть связано с многочисленными продолжительными эпизодами полициклического регионального метаморфизма Алданской гранулитогнейсовой области [Котов и др., 1999]. В частности, нельзя исключить, что упомянутые выше гравитационные аномалии отражают крипотектоническую зону повышенных давлений и температур палеопротерозойского этапа андерплейтинга, связанную не с литостатической нагрузкой, как и в случае генезиса алмазов [Соболев, 1960], а с давлением головы мантийного полума [Добрецов и др., 2001]. Это сыграло важную роль в механизме внедрения гранулитового диапира, на чем мы еще остановимся.

#### U-Pb-ВОЗРАСТ ЦИРКОНОВ И РУТИЛА ГРАНАТОВЫХ ГРАНУЛИТОВ

Для проведения изотопно-геохронологических исследований U-Pb-методом, из предварительно раздробленных и обработанных проб гранатовых гранулитов было отобрано пять зерен циркона и два зерна рутила (табл. 1, рис. 5, 6); цирконы представлены двумя морфотипами. На фотографиях зерен цирконов в обратных электронах (BSE) и катодолюминесценции (CL) первый морфотип представлен прозрачными светло-розовыми (реже темно-фиолетовыми) изометричными кристаллами размером от  $0.105 \times 0.105$  до  $0.140 \times 0.140$  мм и массой от  $4.6 \cdot 10^{-6}$  до  $10.9 \cdot 10^{-6}$  г (см. рис. 5). Их поверхности слабо корродированы, а на BSE- и

CL-изображениях видно их зональное строение (см. рис. 5: 1а, б–4а, б). Тонкие зоны часто не выдержаны по мощности и не имеют четких границ. В некоторых случаях наблюдается увеличение числа зон в краевых частях, причем контуры этих зон отражают быструю смену огранки во время их роста. Некоторые зерна цирконов деформированы и трещиноваты по краям. Такой морфотип цирконов обычно вырастает в условиях высоких температур гранулитовой фации метаморфизма [Каулина, 2010], что подтверждает высказанную ранее мысль о *PT*-условиях внедрения гранулитового диапира.

Рутил представлен обломками или, реже, цельными черными непрозрачными кристаллами призматического и дипирамидального габитуса; иногда встречаются длиннопризматические и игольчатые кристаллы. Мелкобугристые и ровные грани кристаллов имеют, соответственно, смолистый и интенсивный металловидный блеск, тусклый на изломе. В меньшем количестве присутствуют кристаллы красновато- и охристо-коричневого цвета и коленчатые двойники рутила.

Второй морфотип цирконов представлен единственным дипирамидальным призматическим прозрачным темно-коричневым кристаллом размером  $0.175 \times 0.105$  мм, массой  $7.7 \times 10^{-6}$  г и  $K_y = 1.6$  (см. рис. 5б); такие кристаллы характерны для магматических пород. Полигранное эксцентричное ядро этого кристалла, а также зоны его роста (разной мощности и морфологии) на BSE- и CL-изображениях выражены нерезко (см. рис. 6: кадры 5а и 5б). Тонкая трещиноватость и деформация на краях зерна, возможно, отражают либо механическое воздействие при внедрении диапира, либо импактное событие. Результатом последнего могли быть процессы сагдукции и первые выплав-

**Таблица 1.** Изотопные U-Pb данные для циркона (1–4, 7) и рутила (5, 6) из гранатовых гранулитов р. Сутам

**Table 1.** U-Pb isotope data for zircons (1–4, 7) and rutile (5, 6) from garnet granulites, Sutam River

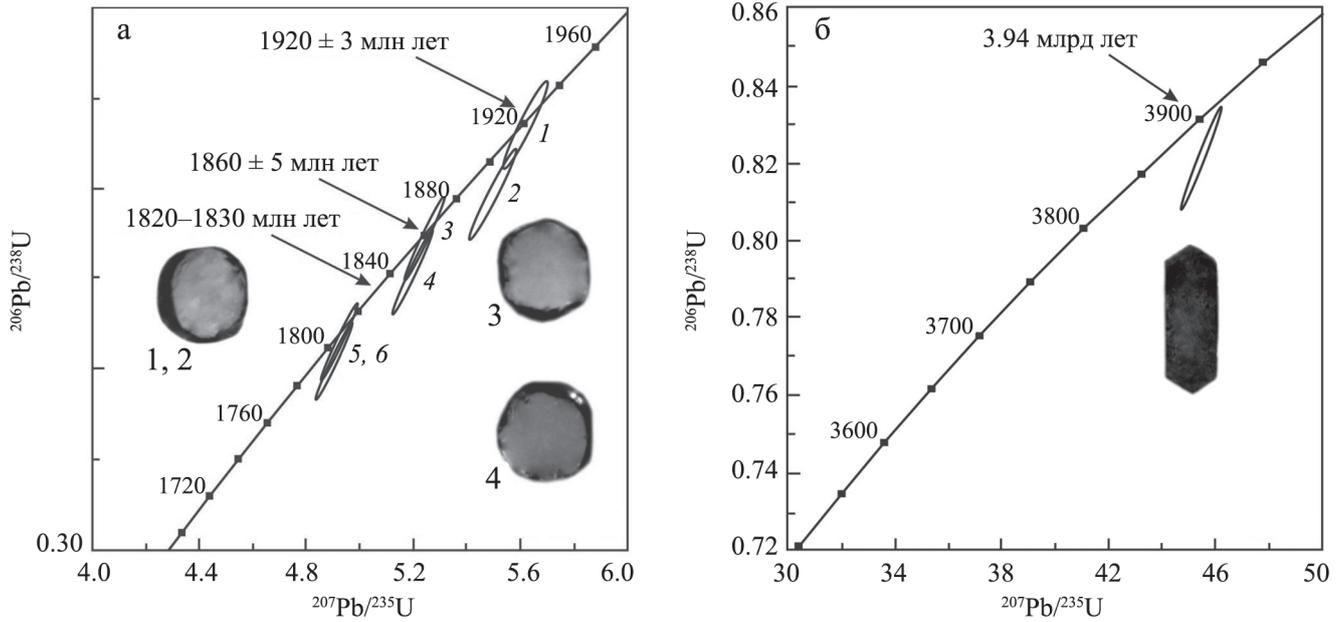
Номер пробы	Навеска, мг	Содержание, ppm		Изотопный состав свинца <sup>1)</sup>			Изотопные отношения и возраст, млн лет <sup>2)</sup>			Rho
		Pb	U	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{207}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{208}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	
1	0.10	83.9	220.9	846	7.0551	9.2006	6.62258	0.346440	2044	0.96
2	0.20	84.2	219.0	1672	7.6906	5.6573	5.49869	0.338648	1986	0.98
3	0.50	149.8	419.6	8280	8.1944	8.4608	5.24472	0.333952	1962	0.99
4	0.40	75.3	204.5	2711	8.0929	6.0947	5.20196	0.330292	1936	0.99
5	0.50	44.8	138.9	1247	8.0293	20.1670	4.92591	0.322545	1860	0.99
6	0.80	33.8	106.9	2181	8.4319	50.1950	4.91259	0.320870	1839	0.99
7	0.20	103.81	146.49	1539	2.5879	5.6001	45.6322	0.8913521	3935	0.99

<sup>1)</sup>Все отношения скорректированы на холостое загрязнение 0.08 нг для Pb и 0.04 нг для U и масс-дискриминацию ( $0.12 \pm 0.04$ )%.

<sup>2)</sup>Коррекция на примесь обыкновенного свинца определена на возраст по модели Стейси и Крамерса [Stacey, Kramers, 1975; Байанова, 2004].

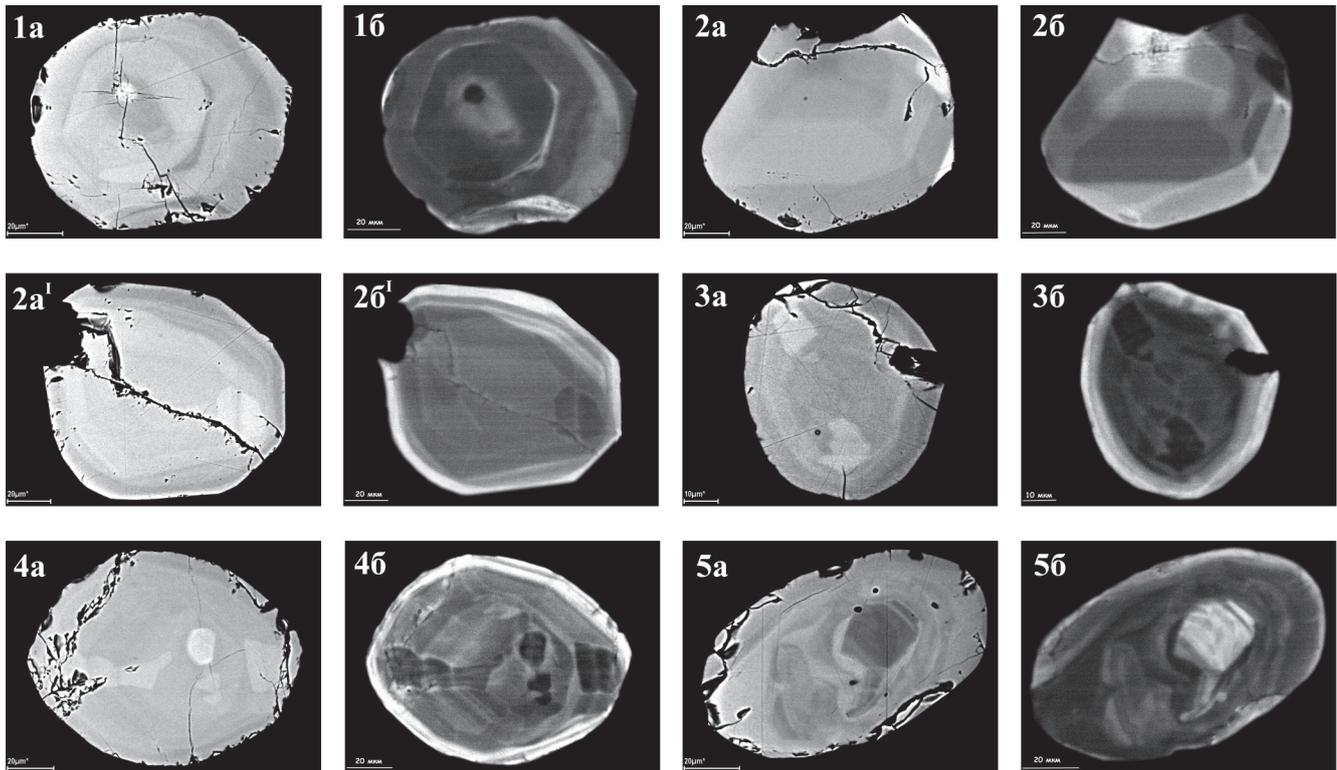
<sup>1)</sup>All ratios are adjusted for idle contamination 0.08 ng for Pb and 0.04 ng for U and mass discrimination ( $0.12 \pm 0.04$ )%.

<sup>2)</sup>Correction for an admixture of ordinary lead is determined by age according to the model of Stacey and Kramers [Stacey, Kramers, 1975; Bayanova, 2004].



**Рис. 5.** U-Pb диаграммы с конкордией для цирконов первого (а) и второго (б) морфотипов с фотографиями в спирту.

**Fig. 5.** U-Pb diagrams with Concordia for zircons of the first (a) and (b) second morphotypes with photos in alcohol.



**Рис. 6.** Фотографии цирконов в BSE (а) и CL (б).

1–4 – цирконы первого морфотипа, 5 – второго морфотипа. Фотографии цирконов 2 даются в двух ракурсах.

**Fig. 6.** Photos of zircons in BSE (a) and CL (б).

1–4 – zircons of the first morphotype, 5 – second morphotype. Photos of zircons 2 are given from two angles.

ки гранитов, представляющих собой “единственные остатки гадейской коры” [Кузьмин, Ярмолюк, 2016, с. 707] в основании Алданского сиалического ядра [Кузьмин, 2014; Глуховский, Кузьмин, 2015].

Возраст цирконов первого морфотипа был определен по четырем точкам из трех кристаллов (см. рис. 5а). Полученные значения –  $1920 \pm 3$  и  $1860 \pm 5$  млн лет – отвечают периоду высокотемпературного и высокобарического палеопротерозойского термотектогенеза. U-Pb возраст рутила – 1830–1820 млн лет (см. рис. 5а, точки 5 и 6; табл. 1), с температурой остывания 400–450°C [Каулина, 2009], – определяет время последнего этапа эволюции Алданского плюма и резкого падения его эндогенной активности. К этому времени континентальная кора всей гранулитогнейсовой области Алданского щита консолидировалась.

U-Pb возраст циркона второго морфотипа, 3.94 млрд лет (см. рис. 5б), близок ко времени завершения гадейского зона: 4.25–4.0 млрд лет [Кузьмин, 2014; Nebel et al., 2014; Кузьмин, Ярмолюк, 2016]. Также подчеркнем, что близкие значения преобладают и среди  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  возраста цирконов из гнейсового комплекса Акаста, при погрешностях  $2\delta$  = от  $\pm 200$  до  $\pm 30$  млн лет [Lizuka et al., 2007]. При этом возраст ядра минерала характеризуют не более 55 из 226 проб цирконов (24.34%); из них только 8 (14.55% от общего числа ядер и 3.54% от всего количества определений) имеют  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  возраст более 4.0 млрд лет. Поэтому находку одного зерна циркона возраста 3.94 млрд лет в гранатовых гранулитах р. Сутам можно считать редкой удачей. Например, в BSE и CL-изображениях (см. рис. 6, кадры 5а, б) оно мало чем отличается от зерна циркона гадея из гнейсового комплекса Акаста (рис. 7)  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  возраста  $3943 \pm 48$  млн лет в ядре и  $3642 \pm 49$  млн лет на его края. Более того, 23 из 34 CL-фотографий цирконов гнейсов района Акаста (или 67.65%) можно сравнить со вторым морфотипом цирконов гранатовых гранулитов р. Сутам [Lizuka et al., 2007, p. 189, fig. 9]. Возраст циркона второго морфотипа из гранатовых гранулитов р. Сутам, установленный методом ID-TIMS, характеризует, скорее всего, верхний предел времени кристаллизации этого зерна в целом.

Анализ Sm-Nd-систематики для глубоко метаморфизованных метаосадочных пород Алданского щита, показал, что фракционирование этой системы во внутрикоровых процессах обычно рассчитывается по двустадийной модели:  $T_{\text{Nd}}(\text{DM-2st})$ , определяющей нижнюю возрастную границу завершения их формирования [Котов, 2003]. Подобные показатели для гранатовых гранулитов р. Сутам, рассчитанные для  $T = 3700$  (предполагаемое время завершения формирования коры выветривания), а так же для  $T = 1900$  и 1800 млн лет, свидетельствуют об их коровой природе:  $\epsilon_{\text{Nd}}(T) = -35.31$ , при  $T_{\text{Nd}}(\text{DM-2st}) = 3408\text{--}3389$  млн лет, в то время

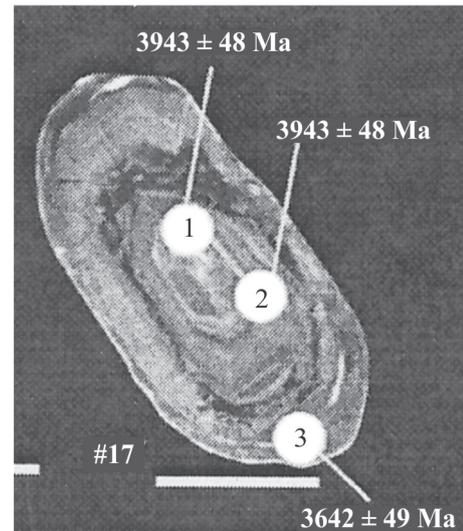


Рис. 7. Катодолуминесцентное изображение циркона ортогнейсов Акаста [Lazuka et al., 2007, см текст].

Fig. 7. Cathodoluminescent image of zircon from Akasta orthogneiss [Lazuka et al., 2007, see text].

как для супракрустальной сутамской толщи (древнее 2.0 млрд лет)  $T_{\text{Nd}}(\text{DM-2st})$  варьирует от 2.5 до 3.0 млрд лет [Котов, 2003]. Это различие показывает, что гранатовые гранулиты р. Сутам действительно относятся к оригинальным парапородам, несопоставимым с парапородами сутамской толщи.

## ГЕОХИМИЯ И ПЕТРОГЕНЕЗИС ГРАНАТОВЫХ ГРАНУЛИТОВ

Выявление зерна циркона гадейского возраста в гранатовых гранулитах, который, скорее всего, был захвачен из древних пород, поставил задачу выявления природы гранулитов и механизма их внедрения в верхние горизонты коры. При этом, учитывается мнение о том, что источником таких цирконов могут быть глубоко захороненные породы зоны выветривания материнских пород [Nebel et al., 2014]. По этой причине было решено проверить версию о кислых высокоглиноземитых гранатовых гранулитах р. Сутам, как о фрагменте метаморфизованной и тектонически вертикально перемещенной коры выветривания, образованной за счет дезинтеграции средней коры на ее границе с верхней. Эта версия опирается на следующие признаки: осадочное происхождение, залегание в виде инъекционного диапира на краю Гонамского купола, совмещенного с гравитационным максимумом, а также гранулитовый высокобарический метаморфизм тектонической природы, контрастный по отношению к вмещающим породам, о чем говорит, в частности, большая плотность породы ( $3.55 \text{ г/см}^3$ ), связанная с инъекционным диапиризмом.

Эта задача решалась путем сравнительной геохимии гранатовых гранулитов и средней коры [Rudnick, Gao, 2003], которая “образована преимущественно породами диоритового состава и осадочно-вулканогенными комплексами, метаморфизованными в условиях амфиболитовой и гранулитовой фаций метаморфизма” [Богатиков и др., 2010, с. 15]. Следует предположить, что между этапом завершения формирования средней коры и началом образования верхней был перерыв, сопровождавшийся выветриванием средней коры, продукты которого залегают на глубине между этими стратиграфическими уровнями. И если гранатовые гранулиты, предположительно, представляют собой метаморфизованные продукты выветривания поверхности средней коры, тогда они должны содержать геохимические метки, типичные для по-

род зон выветривания субстрата при условии изохимичности процессов метаморфизма.

Из табл. 2 видно, что из гранулитов, как возможных гипергенных образований, выносились наиболее подвижные породообразующие элементы, такие как Na, Ca и Sr, а также, в незначительных количествах, Si и Mg. Менее подвижные элементы, такие как Fe, Al, Ti, Mn, P, Y, Nb, K и Rb, либо вели себя инертно, либо накапливались в разной степени, что типично для зон выветривания [Полынов, 1934; Матреничев и др., 2005; Алфимова, 2006; Конев, 2012]. Заметное увеличение количества Zr было связано с устойчивостью циркона [Корякин, 1975]. В гранулитах как продуктах выветривания происходило накопление U и Th [Жмодик, 1979], а также почти всего спектра РЭ и суммы РЭ [Полынов, 1934], которая возрастает в

**Таблица 2.** Баланс содержания окислов в %, редких и редкоземельных элементов в ppm в средней коре (А) [Rudnick, Gao, 2003] и в гранатовых гранулитах р. Сутам (Б), как возможных протолитов коры выветривания средней коры. Процент абсолютной (В = Б – А) и (К) – коэффициент относительной (Г = Б / А) разницы в содержаниях элементов. Шрифты: жирный – вынос (–) и обычный – привнос (+) подвижных элементов

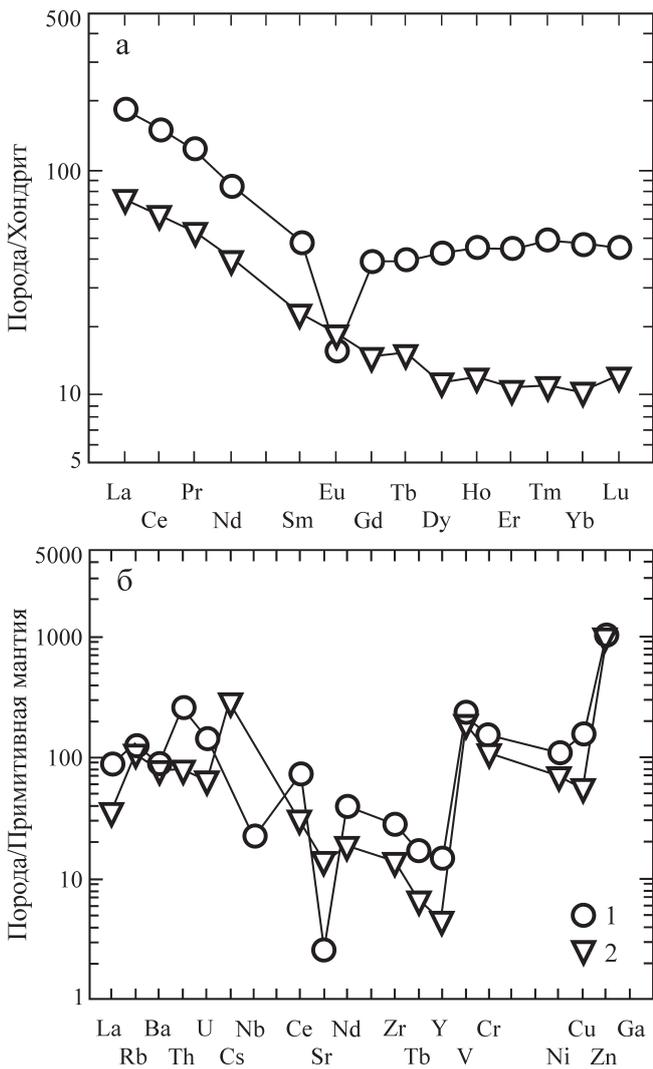
**Table 2.** Balance of oxide contents (in %), rare and rare earth elements in ppm in the middle crust (A) [Rudnick, Gao, 2003] and in garnet granulites of Sutam river (Б), as possible protoliths of weathering of middle crust. Percent is absolute (B = Б – А) and (K) – relative coefficient (Г = Б / А) of difference in element concentrations. Bold – removal (–) and supply (+) of mobile elements

Компонент	А	Б	В	Г	Компонент	А	Б	В	Г
1	2	3	(%) 4	(К) 5	1	2	3	4	5
SiO <sub>2</sub>	63.50	56.38	<b>-7.12</b>	<b>0.89</b>	Ba	532	623	+91	1.17
TiO <sub>2</sub>	0.69	0.85	+0.16	1.23	La	24	61	+37	2.54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.00	23.30	+8.30	1.55	Ce	53	130	+77	2.45
FeO	6.02	9.00	+3.02	1.49	Pr	5.8	13.9	+8.1	2.40
*Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	3.40	–	–	Nd	25	54	+29	2.16
MnO	0.10	0.17	+0.07	1.70	Sm	4.6	9.8	+5.2	2.13
MgO	3.59	3.40	<b>-0.19</b>	<b>0.95</b>	Eu	1.4	1.2	<b>-0.2</b>	<b>0.86</b>
CaO	5.25	0.60	<b>-4.65</b>	<b>0.11</b>	Gd	4	11	+7	2.75
Na <sub>2</sub> O	3.39	0.45	<b>-2.94</b>	<b>0.13</b>	Tb	0.7	1.9	+1.2	2.71
K <sub>2</sub> O	2.30	2.39	+0.39	1.04	Dy	3.8	14.6	+10.8	3.84
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.15	0.06	<b>-0.09</b>	<b>0.40</b>	Ho	0.82	5.19	+4.37	6.33
Σ	100	100			Er	2.3	10.0	+7.70	4.35
V	107	141	+34	1.32	Tm	0.32	1.47	+1.15	4.59
Cr	76	114	+38	1.50	Yb	2.2	10.3	+8.1	4.68
Co	22	26	+4	1.18	Lu	0.4	1.55	+1.15	3.86
Ni	33.5	54	+20.5	1.62	Hf	4.4	9.1	+4.7	2.07
Cu	26	74	+48	2.85	Ta	0.6	0.89	+0.29	1.48
Zn	69.5	76	+6.5	1.09	Pb	15.2	17	+1.8	1.12
Ga	17.5	26	+8.5	1.49	Th	6.5	22	+15.5	3.38
Ge	1.1	4.27	+3.17	3.88	U	1.3	3.05	+1.75	2.35
Rb	65	78	+13	1.20	Σ REE	128.34	323.31	+194.97	2.52
Sr	282	57	<b>-225</b>	<b>0.20</b>	(La/Yb) <sub>N</sub>	7.3	3.96	<b>-3.34</b>	<b>0.54</b>
Y	20	70	+50	3.50	Eu/Eu*	0.96	0.36	<b>-0.60</b>	<b>0.38</b>
Zr	149	320	+171	2.15	Th/U	4.9	7.21	+2.31	1.47
Nb	10	16	+6	1.60	Zr/Hf	33.9	35.16	+1.26	1.04
Mo	0.6	1.7	+1.1	2.83	Nb/Ta	16.5	18	+1.50	1.09
Sn	1.3	0.67	<b>-0.63</b>	<b>0.52</b>	La/Ta	42	68.5	+26.5	1.63

\*Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – общее содержание железа. Прочерк – отсутствие определений.

\*Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is the total iron content. Dash – lack of definition.

2.5 раза (кроме уменьшения содержания Eu, что, как и в случае со Sr, вызвано растворением и выносом плагиоклаза). Это наглядно видно на диаграмме распределения легких и тяжелых РЗЭ, нормированных по хондриту (рис. 8а). Преобладание  $Al_2O_3$  над  $Fe_2O_3$ , равно как и другие петро- и геохимические показатели, а также тенденция к накоплению всех лантаноидов (табл. 2–4) свидетельствуют о возможности рассмотрения гранатовых гранулитов р. Сутам как протолитов верхней аллитной подзоны IVб гумидной зоны выветривания гранитов



**Рис. 8.** Нормированное по хондриту распределение РЗЭ (а) и спайдер-диаграмма нормированных по примитивной мантии некогерентных элементов для гранатовых гранулитов и диоритов средней коры (б) [Rudnick, Gao, 2003].

**Fig. 8.** Chondrite-normalized REE distribution (a) and spider-diagram normalized from primitive mantle of incoherent elements garnet granulites and diorites of the middle crust (b) [Rudnick, Gao, 2003].

[Полынов, 1934; Сиротин, Белявцева, 2011; Конне, 2012].

Возможно, диоритовая средняя кора отражает состав гетерогенного субстрата, который включает в себя граниты, обогащенные Zr, U и Th, а также базиты двух генераций. Одна из них может быть частью метаморфизованной вулканогенно-осадочной серии средней коры [Rudnick, Gao, 2003; Богатиков и др., 2010], а другая, более древняя, – ксенолитами нижней протокры за счет частичного плавления которой образовывались среднекоровые гранитоиды гадея. Именно они могли быть источником для древнейших цирконов. На спайдер-диаграмме нормирования по примитивной мантии видно почти равное обогащение средней коры и гранатовых гранулитов V, Cr, Ni, Cu, Zn и Ga – элементами, типичными для базитов (рис. 8б). На этой диаграмме также видны сравнительные характеристики других элементов, перечисленные выше, включая стронциевый минимум в гранулитах.

По всей видимости, особый физико-географический режим формирования гранатовых гранулитов как продуктов выветривания средней ко-

**Таблица 3.** Содержания (ppm) и отношения некоторых микроэлементов в тонкозернистых осадочных породах архея возрастом более 3.0 млрд лет по [Teylor, McLennan, 1985; Маслов, 2007] по сравнению с гранатовыми гранулитами р. Сутам. как протолитом коры выветривания средней коры

**Table 3.** Contents (ppm) and ratio of some trace elements in the Archean fine-grained sedimentary rocks (older than 3 Ga) by [Teylor, McLennan, 1985; Maslov, 2007] as compared with garnet granulites of Sutam river as a protoliths of weathering of middle crust

Элементы и их отношения	В породах архея	В гранулитах р. Сутам
Co	40	26
Ni	250	54
Nb	9	16
La	20 ± 3	61
Ce	42	130
Yb	2	10.3
Hf	3.5	9.1
Th	6.7 ± 1.1	22
U	1.7 ± 0.3	3.05
Th/U	102 ± 15	323.91
La/Yb	3.8 ± 0.3	7.21
La <sub>N</sub> /Sm <sub>N</sub>	11.75 ± 2.5	5.92
La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	3.15	3.92
Gd <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	6.8	4.00
Eu/Eu*	1.38	0.79
La/Sm	0.99 ± 0.05	3.54
La/Th	~5	6.22
Co/Hf	3.3 ± 0.3	2.86
Ce/Cr	0.1	1.14
LREE/HREE	7.4 ± 0.8	4.87

**Таблица 4.** Петрохимические генетические модули гранатовых гранулитов р. Сутам и их интерпретация как показателей обстановок осадкообразования протолита [Интерпретация..., 2001; Шатров, Войцеховский, 2009; Сиротин, Белявцева, 2011]

**Table 4.** Petrochemical genetic modules of garnet granulites of Sutam rive and their interpretation as indicators of protolith sedimentation environment [Interpretation..., 2001; Shatrov, Voitsekhoovskii, 2009; Sirotin, Belyavtseva, 2011]

Модули	Формула	Значение	Интерпретация
Гидролизаторный	$Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO/SiO_2$	0.69	Гидролизаторные глинистые породы, содержащие либо каолинит, либо свободные оксиды Al, Fe, Mn
Алюмокремниевый	$Al_2O_3/SiO_2$	0.42	Гидролизаторные породы, связанные с корами выветривания
Фемический	$Fe_2O_3 + FeO + MgO/SiO_2$	0.28	То же, обогащенные Fe
Титановый	$TiO_2/Al_2O_3$	0.36	Континентальные гумидные условия отложения
Натриевый	$Na_2O/Al_2O_3$	0.019	Гидролизаторные отложения, за счет разрушения пород близких к грауваккам
Калиевый	$K_2O/Al_2O_3$	0.10	Гидролизаторная кора выветривания с хлоритом
Щелочной	$Na_2O/K_2O$	0.19	Низконатриевые породы
Сумма модулей	$Na_2O + K_2O/Al_2O_3$	0.12	Низкощелочные породы
Железный	$Fe_2O_3 + FeO + Mn/Al_2O_3 + TiO_2$	0.51	Глиноземисто-железистый состав пелитов
Плагиоклазовый	$CaO + Na_2O/K_2O$	0.44	Глинистые отложения
Индекс хим. выветривания (CIA)	$[Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] \times 100$	83.96	Показатель умеренной интенсивности химического выветривания в обстановке гумидного климата
$\sum Ce/\sum Y$ – климат	$\sum Ce : (La-Eu)$ $\sum Y : (Gd-Lu)$	6.33	Показатель выветривания в условиях гумидного климата
Индекс зоны выветривания	$\sum REE + Y$	393.31	Показатель верхней аллитной подзоны IVб коры выветривания

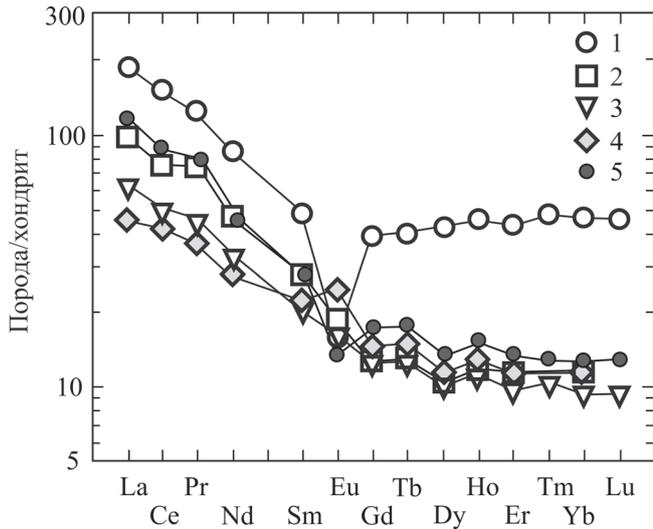
ры повлиял на различие в составе и в соотношениях некоторых микроэлементов, обычно присущих зрелым осадочным породам архея и постархея (см. табл. 3). Это хорошо видно и на диаграмме спектров распределения РЗЭ, нормированных по хондриту (рис. 9) гранатовые гранулиты, по сравнению с парапородами архея, заметно обогащены легкими и в более значительной степени – тяжелыми РЗЭ, при резком Eu минимуме, о причине которого говорилось выше. В отличие от гранатовых гранулитов, все семейство парапород архея характеризуется относительно плавным снижением значений легких РЗЭ по отношению к значениям тяжелых РЗЭ, нормированным по хондриту. Это может свидетельствовать об ином составе и иной кислотности растворов разновозрастных зон гипергенеза во время деструкции поверхности средней коры, об ином составе субстрата и атмосферы, которая в то время была бескислородной, и об иных реагентах выветривания, в том числе о количестве, солености, щелочности и кислотности воды с уровнем pH = 5.5. Эти параметры ускоряли выветривание гранитов, базальтов и других пород [Hazen, 2012].

Итак, анализ всего вышеизложенного материала позволяет думать, что гранатовые гранулиты р. Су-

там можно отнести к глубоко метаморфизованным продуктам выветривания гетерогенной средней коры. Протолит гранулитов формировался в условиях гумидного палеоклимата в верхней аллитной зоне гипергенеза IVб за счет разложения и сложной ассоциации пород валового диоритового состава. Эта ассоциация пород средней коры могла состоять не только из гранитов и осадочно-вулканогенных образований, метаморфизованных в гранулитовой или амфиболитовой фациях [Богатиков и др., 2010]: в ее состав могли входить и базиты с повышенным содержанием Al и Fe, а также V, Cr, Ni, Cu, Ge и тяжелых РЗЭ. Вывод о гумидном климате согласуется с многочисленными палеомагнитными данными, которые свидетельствуют о субэкваториальном положении эпиархейского суперконтинента [Глуховский, Кузьмин, 2015] с влажным и теплым климатом.

#### О МЕХАНИЗМЕ ВНЕДРЕНИЯ ГРАНАТОВЫХ ГРАНУЛИТОВ р. СУТАМ, КАК ПРОТОЛИТА ПОСТГАДЕЙСКОЙ КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ

Как подчеркивалось выше, важнейшая роль в тектономагматическом развитии Алданского щит-



**Рис. 9.** Нормированное по хондриту распределение РЗЭ для гранатовых гранулитов, парапород архея древнее 3.0 млрд лет и постаршейского глинистого сланца Австралии – PAAS [Taylor, McLennan, 1985].

1 – гранатовые гранулиты р. Сутам; 2–4 – псаммиты и метапилиты: 2 – Пилбара, 3 – средний состав архейского аргиллита, 4 – пояс Малене, 5 – PAAS.

**Fig. 9.** Chondrite-normalized REE distribution for garnet granulites, Archean pararocks (ancient than 3 Ga) and post-Archean clay shale, Australia – PAAS [Taylor, McLennan, 1985].

1 – garnet granulites, Sutam river; 2–4 – psammite and metapelite: 2 – Pilbara, 3 – average composition of Archean argillite, 4 – Malene belt, 5 – PAAS.

та принадлежала процессам палеопротерозойского андерплейтинга и связанного с ним термотектогенеза (2.8–1.9 млрд лет), которые были вызваны возрождением Алданского плюма [Глуховский и др., 1993, 2005; Глуховский, 2009]. Этот длительный процесс сопровождался как прогрессивным, так и регрессивным региональным метаморфизмом пород, куполообразованием, а также формированием масштабной кольцевой тектонически разобранной магматической системы анортозитов и связанных с ними гранитов (по модели Г.Х. Грина, [1968]) (см. рис. 1). К геологическим последствиям этого явления относится не только зарождение очагов пород анортозит-гранитной ассоциации, но и горизонтальные радиальные потоки протяженностью до 500 км с “анортозитовой кашей” и связанными с ней гранитами, устремленные из центра Алданского плюма в сторону его периферии (см. рис. 1). Отсюда и вариации в *PT*-условиях метаморфизма и диапиризм пород с относительно больших глубин. Это предположение подтверждают анализ центрального размещения палеопротерозойских автономных анортозитов, плитообразные массивы ко-

торых вергенты направлены к глубинным тектоническим потокам и тектонически разобраны с ними, но комплементарны по распределению РЗЭ аляскинских гранитов палеопротерозоя, малых тел анортозитов и реститовых эклогитов, а также плотных гранулитовых и эклогитоподобных пород субстрата вокруг массивов анортозитов. Все это отражается в аномальном положительном гравитационном поле, типичном для кольца массивов автономных анортозитов как Алданского щита, так и за его пределами (см. рис. 1).

Отсюда следует вывод о том, что формирование сублинейной крипто тектонической полиметаморфической зоны, отраженной в виде полосы Сутамского аномального гравитационного максимума, в пределах которого располагаются гранатовые гранулиты, также можно объяснить механизмом движения глубинных термодинамических потоков с концентрацией критических *PT*-условий около тектонического барьера в виде Станового разлома. Это хорошо видно на рис. 1 и на профиле МОВЗ [Борукаев и др., 1990; Глуховский, 2009].

С движением этих потоков была связана не только транспортировка “анортозитовой каши”, но и ассоциирующая с ней гранитов – поставщиков захваченных зерен цирконов, как это наблюдается в Каларском массиве [Глуховский и др., 2011]. Крупномасштабная пропация этих анортозит-гранитных потоков, которые трассируются малыми телами анортозитов, эклогитов и гранитов (см. рис. 1), по всей видимости, сопровождалась скреперным механизмом в основании потоков. С ним могли быть связаны разрушения, срывы и захват фрагментов нижней и средней коры в виде нижнекоровых метакристаллов и ультрабазитов (см. рис. 1, 2), равно как и фрагментов зоны выветривания средней коры. Скорее всего, их перемещение в верхние горизонты коры в виде гранулитовых диапиров (как мета- и ультрабазитов) происходило дискретно, под большим давлением и температурой и было связано с вертикальным вектором напряжения горизонтальных тектонических протоков с “анортозитовой кашей”.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, гранатовые гранулиты среднего течения р. Сутам рассматриваются как метаморфизованные фрагменты верхней подзоны IVб мощной аллитной зоны выветривания средней коры. Эта зона формировалась в условиях гумидного климата, когда эпипалеозойский суперконтинент располагался в субэкваториальной области Земли [Глуховский, Кузьмин, 2015]. В период действия полициклических ротационно-плюмовых процессов в палеопротерозое, в ходе движения радиальных горизонтальных тектонических гранит-анортозитовых потоков, исходивших под большим давлением из “голо-

вы Алданского плюма, Сутамский фрагмент метаморфизованного и деформированного слоя из зоны выветривания средней коры IVб в виде инъекционного диапира был дискретно (1.92, 1.86 и 1.82 млрд лет) внедрен в породы верхней коры, что по времени коррелируется с большинством палеопротерозойских интрузивов автономных анортозитов и связанных с ними гранитов. Это время длительной консолидации континентальной коры не только Алданского щита, но и всего фундамента Сибирского кратона. Если возраст циркона 1.86 млрд лет считать временем окончательного отрыва фрагмента метаморфизованной коры выветривания от субстрата, то можно полагать, что продолжительность его дискретного тектонического транспорта в верхние горизонты коры, сопровождаемого высокобарным и высокотемпературным метаморфизмом, дегидратацией (уплотнением) и остыванием до 400–450°C на рубеже 1.82 млрд лет, определяет градиент 40–30 млн лет.

Гранатовые гранулиты р. Сутам, синхронные анортозитам, по всем вышеописанным признакам можно рассматривать как метаморфизованные и тектонически перемещенные фрагменты постгадейской коры выветривания. Подобный способ разрушения древнего субстрата и попадания циркона, устойчивого к таким процессам, в зону выветривания этого субстрата с последующим выводом циркона в верхние горизонты континентальной коры хорошо согласуется с данными анализа изотопов кислорода и лития в цирконах гадея Западной Австралии. Эти анализы показывают, что материнские породы цирконов гадея подверглись выветриванию с дальнейшим захоронением до глубокого уровня коры [Nebel et al., 2014]. Это также согласуется с мнением о том, что поскольку в гадее Земля обладала атмосферой и гидросферой, то “материнские для гадейских цирконов гранитные магмы должны были взаимодействовать с водой или иметь в источнике породы, которые взаимодействовали с водой (типа глинистых сланцев)” [Кузьмин, Ярмолюк, 2016, с. 707]. В условиях гранулитового метаморфизма протолиты такого состава и превратились в гранатовые гранулиты с относительно высоким содержанием глинозема.

В связи с этим встает вопрос о реальном возрасте зоны выветривания средней коры Алданского щита, поскольку постгадейское время формирования этой зоны (3.94 млрд лет) основано на U-Pb возрасте одного зерна захваченного магматического циркона, который был определен методом ID-TIMS, а не SHRIMP-II. Характеризуя ID-TIMS как прецизионный метод датирования, отметим неоднозначность его результатов. Например, этим методом были получены геологически непротиворечивые данные о длительности тектоно-магматических событий в пределах Кольского региона [Баянова, 2004; Митрофанов, Баяно-

ва, 2011; Баянова и др., 2013]. Более того, датирование возраста цирконов гадея из ортогнейсов района Акаста (Канадский щит) обоими методами практически совпало: 4.03–3.94 млрд лет [SHRIMP: Lizuka et al., 2007] и  $4.019 \pm 1.8$  млрд лет [ID-TIMS: Reimnik et al., 2016]. И напротив, применение обоих методов к U-Pb датированию возраста циркона из гнейсо-гранитов в бассейне р. Калар [Рыцк и др., 2009] показало разрыв в 55 млн лет между данными SHRIMP-II и ID-TIMS (325 и до 270 млн лет соответственно), поэтому последний показатель возраста циркона в целом можно оценивать только как его верхний предел.

О возможно более древнем возрасте циркона из гранатовых гранулитов р. Сутам косвенно свидетельствует наличие в нем ядра (см. рис. 6: кадры 5а и 5б). По этой причине U-Pb возраст циркона по зерну в целом – 3.94 млрд лет – также можно оценить как верхний возрастной предел предполагаемого гадейского источника этого минерала и еще раз подтвердить версию о метаморфизованной и тектонически перемещенной постгадейской коре выветривания. В этом отношении интересен результат проведенного нами расчета среднего возраста детритового циркона гадея RSES 96 15.10 из кварцитов района Джек Хиллс (Jack Hills) в Западной Австралии, опубликованного в [Кузьмин, 2014; Nebel et al., 2014]. При среднем возрасте двух точек в ядре зерна 4.305 млрд лет и возрасте его края 3.623 млрд лет возраст зерна в целом, 3.96 млрд лет, практически совпадает с U-Pb-возрастом зерна циркона из гранулитов р. Сутам, датированного ID-TIMS в 3.94 млрд лет.

Итак, в случае если верна версия о протолите гранатовых гранулитов как о метаморфизованном и вертикально тектонически перемещенном фрагменте верхней аллитной зоны выветривания средней коры IVб, то тогда циркон гранатовых гранулитов возраста 3.94 млрд лет можно рассматривать как детритовое зерно, характеризующее верхний возрастной предел материнской породы, которая входила в состав средней коры Алданского щита и которая вмещала не только граниты гадея, но также базиты и ультрабазиты как один из возможных источников гранитного материала, материнского для древнего циркона. Это предположение совпадает с выводом, основанным на данных по другим районам нахождения цирконов гадея. Например, на основании изотопии Hf в цирконах гнейсового комплекса Акаста (4.03–3.94 млрд лет) [Lizuka et al., 2007; Reimnik et al., 2016] и района Джек Хиллс (4.37–4.1 млрд лет) [Nebel et al., 2014] делается вывод о более сложном составе коры того времени, вплоть до утверждения о ведущей роли основных и ультраосновных пород. При этом не исключают действие механизмов тектоники плюмов в гадее, вызванных поздней тяжелой бомбардировкой базитовой протокоры, а также процессы формирования

крупных сиалических ядер (нуклеаров) и зарождения малых резервуаров гранитоидов в больших мафических областях [Кузьмин, 2014; Глуховский, Кузьмин, 2015]. Это могло сопровождаться внутрикорвым рециклированием (сагдукцией) и захоронением жидких гранитных источников гадейских цирконов [Nebel et al., 2014]. Возможно, что эти граниты в виде жил с захваченными цирконами гадея впоследствии могли быть ремобилизованы и выведены на поверхность, а в процессе последующего полихронного рециклирования, анатексиса и метаморфизма – превратиться в ортогнейсы, содержащие захваченный циркон. Именно такие протокрустальные породы, полностью захоронившие источник древних цирконов с U-Pb- и Sm-Nd-“памятью” (4.0–3.9 млрд лет), наследуются ортогнейсами района Акаста [Moogbat et al., 1997] в силу того, что они оказались менее деформированы, чем окружающие их гнейсы возраста 3.74–3.4 млрд лет [Скобелев и др., 2004; Bowring, Williams, 1999; Lizuka et al., 2007; Nebel et al., 2014].

В заключение отметим, что:

1. Впервые на территории России (Алданский щит) методом ID-TIMS в гранатовых гранулитах проанализировано зерно циркона U-Pb – возрастом 3.94 млрд лет. Это, по существу, третий случай обнаружения на Земле детритовых цирконов гадейского эона после находок цирконов со средним возрастом 4.35 млрд лет на северо-западе Австралии (мезоархейские кварциты Jasck Hill) и на западе Канады (ортогнейсы Acasta) возрастом 4.1–3.94 млрд лет. Полученное значение возраста, скорее всего, определяет верхний возрастной предел формирования первой континентальной коры Сибирского кратона.

2. Сравнительная геохимия гранулитов р. Сутам (Алданский щит) и пород средней коры, а также анализ состава и геохронологии гранулитов показал, что их протолитом могли быть породы из зоны выветривания средней коры, содержащей захваченный из гранитов гадея магматический циркон возрастом 3.94 млрд лет. Это свидетельствует о постгадейском возрасте аллитной зоны выветривания (подзона IVб) средней коры и о гранатовых гранулитах, как о возможном фрагменте метаморфизованной и тектонически перемещенной постгадейской коры выветривания.

3. Механизм внедрения диапира гранатовых гранулитов в верхний горизонт гранито-гнейсовой оболочки архея был связан с движением палеопротерозойских радиальных анортозит-гранитных тектонических потоков из центра Алданского плюма к его периферии. Дискретный двухэтапный инъекционный диапиризм, сопровождался высокотемпературным (до 840°C) и высокобарным (до 1.0 и более ГПа) гранулитовым метаморфизмом протолита, о чем свидетельствуют минеральный состав пород и округлая (гранулитовая) форма цирконов возраст-

том 1.92 и 1.86 млрд лет. Этот процесс завершился на фоне падения температуры до 400–450°C около 1.83–1.82 млрд лет назад (U-Pb возраст рутила) и окончательной консолидации континентальной коры Сибирского кратона.

4. Корреляция морфотипа циркона возрастом 3.94 млрд лет из гранатовых гранулитов р. Сутам с цирконами гадея ортогнейсов района Акаста (67.6% сходимости) гармонирует с данными палеомагнитной реконструкции Сибирского и Северо-Американского кратонов, которые в раннем докембрии составляли единый континентальный блок субэкваториального эпиархейского суперконтинента [Глуховский, Кузьмин, 2015 и др.] с вероятно близким составом и возрастом погребенной средней коры.

5. Поскольку возраст циркона 3.94 млрд лет (ID-TIMS) интерпретируется как верхний возрастной предел гадея, хотя, как видно на примере гнейсов Акаста, не исключены совпадения со SHRIMP, авторы планируют в дальнейшем провести локальное U-Pb датирование удлинённых зерен циркона из гранулитов р. Сутам при помощи ионного микроскопа SHRIMP-II.

Авторы выражают благодарность С.П. Кориловскому и В.И. Мокрыгиной за научные консультации и ценные советы, а также А.В. Горегляду, Д.Б. Горбатову, Н.В. Левкович, Е.В. Макаровой и Л.Ф. Сергачевой за помощь в проведении аналитических работ и в оформлении статьи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алфимова Н.А., Матреничев В.А. (2006) Континентальное выветривание в раннем докембрии: особенности минеральных преобразований и состав гипергенных растворов *Литология и полезн. ископаемые*, **41(6)**, 518–529.
- Баянова Т.Б. (2004) Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма. СПб.: Наука, 174 с.
- Баянова Т.Б., Морозова Л.Н., Федотов Ж.А., Нерович Л.И., Белоусова Е.А., Митрофанов Ф.П. (2013) Прецизионное (ID-TIMS) U-Pb датирование единичных зерен циркона и бадделеита для целей региональной геохронологии Балтийского щита. *Геология и геохронология породообразующих и рудных процессов в кристаллических щитах. Мат-лы Всерос. (с междунар. участием) конф.* Апатиты: К & М, 24–26.
- Богатиков О.А., Коваленко В.И., Шарков Е.В. (2010) Магматизм, тектоника, геодинамика Земли. Связь во времени и пространстве. М.: Наука, 606 с.
- Борукаев Ч.Б., Булин Н.К., Виноградов Н.П., Косыгин Ю.А., Мальшев Ю.Ф., Смыслов А.А., Черкасов Р.А. (1990) Алданская сверхглубокая скважина: проблема места заложения. *Тихоокеан. геол.*, (1), 36–55.
- Глуховский М.З. (1990) Геологическая эволюция фундаментов древних платформ (нуклеарная концепция). М.: Наука, 215 с.

- Глуховский М.З. (2009) Палеопротерозойский термотектогенез – ротационно-плюмовая модель Алданского щита. *Геотектоника*, (3), 57-78.
- Глуховский М.З., Баянова Т.Б., Левкович Н.В. (2005) Новые данные об изотопном U-Pb возрасте гиперстеновых гранодиоритов Алданского щита и проблема зональности процессов палеопротерозойского термотектогенеза. *Докл. АН*, **404**(4), 524-528.
- Глуховский М.З., Кузмин М.И. (2015) Внеземные факторы и их роль в тектонической эволюции Земли в раннем докембрии. *Геол. и геофиз.*, **56**(7), 1225-1249.
- Глуховский М.З., Кузмин М.И., Баянова Т.Б., Баженова Г.Н., Елизаров Д.В., Серов П.А. (2011) Автономные анортозиты Алданского щита и связанные с ними породы: возраст, геохимия и механизм образования (на примере Каларского массива). *Докл. АН*, **439**(5), 651-659.
- Глуховский М.З., Моралёв В.М. (2001) Гонамский эндербитовый купол Алданского щита – реконструкция тектонической эволюции. *Геотектоника*, (5), 10-25.
- Глуховский М.З., Моралёв В.М., Суханов М.К. (1993) Тектоническое положение раннепротерозойских анортозитов и гранитоидов Алданского щита и зональность процессов термотектогенеза. *Геотектоника*, (3), 69-81.
- Грин Т.Х. (1968) Экспериментальное исследование генезиса анортозитов при высоких давлениях. *Петрология верхней мантии*. М.: Мир, 228-255.
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.А., Кирдяшкин А.Г. (2001) Глубинная геодинамика. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филиал "ГЕО", 408 с.
- Жмодик С.М. (1979) Торий-урановое отношение в процессах выветривания и его индикаторная роль. *Докл. АН СССР*, **247**, 1489-1493.
- Интерпретация геохимических данных. (2001) (Ред. Е.В. Скляров). М.: Интермет Инжиниринг, 288 с.
- Кастрыкина В.М. (1976а) Термодинамические условия формирования пород Сутамского комплекса. Термодинамический режим метаморфизма. М.: Наука, 267-273.
- Кастрыкина В.М. (1976б) Минералогия метаморфических пород Сутамского комплекса архея Алданского щита. Современные методики петрологических исследований. М.: Наука, 56-76.
- Каулина Т.В. (2009) Заключительные стадии метаморфической эволюции Колывитского пояса и Уламбинского блока (юго-восточная ветвь Лапландского гранулитового пояса). U-Pb датирование циркона, титанина, рутила. *Вестник МГТУ*, **12**(3), 386-393.
- Каулина Т.В. (2010) Образование и преобразование циркона в полиметаморфических комплексах. Апатиты: КНЦ РАН, 144 с.
- Коне А.М. (2012) Строение, состав и свойства латеритной коры выветривания Лионо-Либерийского кристаллического массива. *Изв. вузов. Геол. и разведка*, (1), 49-55.
- Кориковский С.П. (1979) Фации метаморфизма метапелитов. М.: Наука, 263 с.
- Кориковский С.П., Кислякова Н.Г. (1975) Реакционные структуры и фазовые равновесия в гиперстениллиманитовых кристаллических сланцах Сутамского комплекса Алданского щита Метасоматиты и оруденение. М.: Наука, 314-341.
- Корякин А.С. (1975) Диагностические критерии метаморфизованной коры выветривания (на примере Центральной Карелии). Докембрийские коры выветривания. М.: Наука, 28-34.
- Котов А.Б. (2003) Граничные условия геодинамических моделей формирования континентальной коры Алданского щита. Диссертация в виде научного доклада. СПб.: ИГ и ГД РАН, 78 с.
- Котов А.Б., Шемякин В.М., Сальникова Е.Б., Ковач В.П. (1999) Этапы формирования и изотопная структура континентальной коры Сутамского блока Алданского щита: Sm-Nd систематика гранитоидов. *Докл. АН*, **366**(6), 809-812.
- Кузьмин М.И. (2014) Докембрийская история происхождения и эволюции Солнечной системы и Земли. Часть I. *Геодинамика и тектонофизика*, **5**(3), 625-640.
- Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В. (2016) Изменение стиля тектонических движений в процессе эволюции Земли. *Докл. АН*, **469**(6), 706-710.
- Маслов А.В. (2007) Метатерригенные породы архея (основные геохимические ограничения). *Геохимия*, (4), 370-389.
- Маракушев А.А. (1965) Проблема минеральных фаций метаморфических и метасоматических горных пород. М.: Наука, 327 с.
- Матреничев В.А., Линькова Л.О., Левченков О.А., Макеев А.Ф., Яковлева С.З., Алфимова Н.А. (2005) Древнейшая кора континентального выветривания гранитов на Балтийском щите. *Докл. АН*, **400**(1), 84-87.
- Митрофанов Ф.П., Баянова Т.Б. (2011) Восточно-Скандинавская палеопротерозойская базитовая обширная изверженная провинция (ВСкБОИП-ESBLIP): геология, геодинамика, длительность формирования. *Проблемы плейт- и плюм-тектоники в докембрии. Мат-лы III Российской конф. по проблемам тектоники и геодинамики докембрия*. С-Пб.: ИГД РАН, 118-120.
- Полынов Б.Б. (1934) Коры выветривания. Ч. 1. Процессы выветривания: основные фазы и формы выветривания. Л.: Изд-во АН СССР, 210 с.
- Рыцк Е.Ю., Макеев А.Ф., Ковач В.П., Богомолов Е.С., Федосеенко А.М. (2009) Возраст гранитоидов зоны сочленения Байкало-Муйского складчатого пояса и Каларского метаморфического террейна. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, **17**(2), 38-46.
- Сиротин В.И., Белявцева Е.Е. (2011) Лантаноиды как индикаторы строения зоны свободного глинозема латеритной коры выветривания КМА. *Докл. АН*, **438**(2), 242-244.
- Скобелев В.М., Степанюк Л.М., Верхогляд В.М. (2004) Геохронология архейских образований Канадского щита. *Минерал. журн.*, **26**(3), 133-145.
- Соболев В.С. (1960) Условия происхождения алмазов. *Геол. и геофиз.*, (1), 8-11.
- Стогний Г.А., Стогний В.В. (2005) Геофизическое поле восточной части Северо-Азиатского кратона. Якутск: Сахаполиграфиздат, 174 с.
- Шатров В.Н., Войцеховский Г.В. (2009) Применение лантаноидов для реконструкции обстановок осадкообразования в фанерозое и протерозое (на примерах разрезов чехла и фундамента Восточно-Европейской платформы). *Геохимия*, (8), 805-824.
- Bowring S.A., Williams I.S. (1999) Priscoan (4.0–4.03 Ga) orthogneisses from northwestern Canada. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **134**, 3-16.

- Hazen R.M. (2012) The story of Earth. The First 4.5 Billion Years from Stardust to Living Planet. USA: Penguin Books, 320 p.
- Lizuka T., Komiya T., Ueno Y., Katayama I., Uehara Y., Maruyama S., Hirata N., Johnson S.P., Dunkley D.J. (2007) Geology and zircon geochronology of the Acasta Gneiss Complex northwestern Canada: New constraints on its tectonothermal history. *Precambrian. Res.*, **153**, 179-208.
- Moorbath S., Whitehouse M.J., Kamber B.S. (1997) Extreme Nd-isotope heterogeneity in the early Archaean – fact or fiction? Case histories from northern Canada and West Greenland. *Chem. Geol.*, **135**, 213-231.
- Nebel O., Rapp R.P., Yaxley G.M. (2014) The role of detrital zircons in Hadean crustal research. *Lithos*, **190-191**, 313-327.
- Reimink J.R., Davies J.H.F.L., Chacko T., Stern R.A., Heaman L.M., Sarkar C., Schaltegger U., Creaser R.A., Pearson D.G. (2016) No evidence for Hadean continental crust within Earth's oldest evolved rock unit. *Nature geosci. Letters*. Advance online publ. Springer, 19 Sept., 1-7.
- Rudnick R.L., Gao S. (2003) Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry* (Ed. D. Holland, K.K. Turekian). Amsterdam: Elsevier, V. 3. The crust. 1-64.
- Stacey J.S., Kamers J.D. (1975) Approximation of terrestrial lead isotope evolution by two-stage model. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **26**(2). 207-221.
- Taylor S.R., McLennan S.M. (1985) The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell, Oxford, 312 p.
- orthogneisses from northwestern Canada. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **134**, 3-16.
- Dobretsov N.L., Kirdyashkin A.A., Kirdyashkin A.G. (2001) *Glubinnaya geodinamika* [Deep geodynamics]. Novosibirsk, SB RAS Publ. "Geo", 408 p. (In Russian)
- Glukhovskii M.Z., Kuzmin M.I., Bayanova T.B., Bazhenova G.N., Elizarov D.V., Serov P.A. (2011) Autonomous anorthosites of the Aldan shield and associated rocks: Age, Geochemistry and formation mechanism (example of the Kalar massif). *Dokl. Earth Sci.*, **439**, 1113-1121.
- Glukhovskii M., Bayanova T.B., Levkovich N.V. (2005) New data on isotope U-Pb age of the hypersthene granodiorites of the Aldan shield and problem of zoning of the Paleoproterozoic thermotectogenesis. *Doklady Akad. Nauk*, **404**(4), 524-528. (In Russian)
- Glukhovskii M.Z. (1990) *Geologicheskaya evolyutsiya fundamentov drevnikh platform (nuklearnaya kontseptsiya)* [Geologic evolution of the basement of ancient platforms (nuclear concept)]. Moscow, Nauka Publ., 215 p. (In Russian)
- Glukhovskii M.Z. (2009) Paleoproterozoic thermotectogenesis: A rotation-plume model of the formation of the Aldan shield. *Geotectonics*, **43**(3), 226-250.
- Glukhovskii M.Z., Kuz'min M.I. (2015) Extraterrestrial factors and their role in the Earth's tectonic evolution in the Early Precambrian. *Russ. Geol. Geophys.*, **56**(7), 959-977.
- Glukhovskii M.Z., Moralev V.M. (2001). The Gonam enderbite dome of the Aldan Shield; a reconstruction of its tectonic evolution. *Geotectonics*, **35**(5), 341-355.
- Glukhovskii M.Z., Moralev V.M., Sukhanov M.K. (1993) Tectonic setting of the Early Proterozoic anorthosites and granitoids of the Aldan shield and zoning of thermotectogenesis. *Geotectonika*, **3**, 69-81 (In Russian)
- Green T.H. (1968) Experimental studies of genesis of anorthosites under high pressures. *Petrologiya verkhnei mantii* [Petrology of upper mantle]. Moscow, Mir Publ., 228-225. (In Russian)
- Hazen R.M. (2012) The story of Earth. The First 4.5 Billion Years from Stardust to Living Planet. USA: Penguin Books, 320 p.
- Interpretatsiya geokhimicheskikh dannikh* (2001) [Interpretation of geochemical data: tutorial] (Ed. E.V. Sklyarov). Moscow, Internet Engineering Publ., 288 p. (In Russian)
- Kastykina V.M. (1976a) Thermodynamic conditions of rock formation, Sutam complex. *Termodinamicheskii rezhim metamorfizma* [Thermodynamic regime of metamorphism]. Moscow, Nauka Publ., 267-273. (In Russian)
- Kastykina V.M. (1976b) Mineralogy of metamorphic rocks of the Archean Sutam complex, Aldan shield. *Sovremennye metody petrologicheskikh issledovaniy* [Recent methods of petrological studies]. Moscow, Nauka Publ., 56-76. (In Russian)
- Kaulina T.V. (2009) Final stages of metamorphic evolution of the Kolvits belt and Ulambin block (south-east branch of the Laplandian granulite belt). U-Pb dating of zircon, titanite, rutile. *Vestnik MGTU*, **12**(3), 386-393. (In Russian)
- Kaulina T.V. (2010) *Obrazovanie i preobrazovanie tsirkona v polimetamorficheskikh kompleksakh* [Formation and transformation of zircon in polymetamorphic complexes]. Apatity, KNTs RAS Publ., 144 p. (In Russian)

## REFERENCES

- Alfimova N.A., Matrenichev V.A. (2006) Continental weathering in Early Precambrian: features of mineral transformations and composition of hypergene solutions. *Litol. Miner. Resour.*, **41**(6), 518-529. (In Russian)
- Bayanova T.B. (2004) *Vozrast repornykh geologicheskikh kompleksov Kolskogo regiona i dlitelnost' protsessov magmatizma* [Age of reference geologic complexes of the Kola region and duration of magmatism processes]. St.Petersburg, Nauka Publ., 174 p. (In Russian)
- Bayanova T.B., Morozova L.N., Fedotov Zh.A., Nerovich L.I., Belousova E.A., Mitrofanov F.P. (2013) Precise (ID-TIMS) U-Pb dating of single zircon and baddeleyite grains for regional geochronology of the Baltic shield. *Geologiya i geokhronologiya porodoobrazuyuschikh i rudnykh protsessov v kristallicheskikh shchitakh. Materialy Vserossiiskoi (s mezhdunarodnym uchastiem) konferentsii* [Geology and geochronology of rock-forming and ore processes in crystalline shields. Proc. of All-Russian (with international participation) Conference]. Apatity, K & M Publ., 24-26. (In Russian)
- Bogatikov O.A., Kovalenko V.I., Sharkov E.V. (2010) *Magmatizm, tektonika, geodinamika Zemli. Svyaz' vo vremeni i prostranstve* [Magmatism, tectonics and geodynamics of the Earth. Relations in time and space]. Moscow, Nauka Publ., 606 p. (In Russian)
- Borukaev Ch.B., Bulin N.K., Vinogradov N.P., Kosygin Yu.A., Malychyev Yu.F., Smyslov A.A., Cherkasov R.A. (1990) Aldan super-deep borehole: problem of location. *Tikhookean. Geol.*, (1), 36-55. (In Russian)
- Bowring S.A., Williams I.S. (1999) Priscoan (4.0–4.03 Ga)

- Kone A.M. (2012) Structure, composition and features of the laterite weathering crust of Lion-Liberian crystalline massif. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Geologiya i razvedka*, (1), 49-55. (In Russian)
- Korikovskii S.P. (1979) *Fatsii metamorfizma metapelitov* [Faces of metapelite metamorphism]. Moscow, Nauka Publ., 263 p. (In Russian)
- Korikovskii S.P., Kislyakova N.G. (1975) Reaction structures and phase equilibrium in hypersthene-sillimanite crystalline schist, Sutam complex, Aldan Shield. *Metasomnitsy i orudnenie* [Metasomatites and mineralization]. Moscow, Nauka Publ., 314-341. (In Russian)
- Koryakin A.S. (1975) Diagnostic criteria of metamorphosed weathering crust (exemplified by the Central Karelia). *Dokembriiskie kory vyvetrivaniya* [Precambrian weathering crusts]. Moscow, Nauka Publ., 28-34. (In Russian)
- Kotov A.B. *Granichnye usloviya geodinamicheskikh modeli formirovaniya kontinentalnoi kory Aldanskogo shchita*. Dis. ... dokt. geol.-min. nauk [Constraints of geodynamic models of continental crust formation on the Aldan shield. Doct. geol. and min. sci. diss.]. St.Petersburg, IG i GD RAS Publ., 78 p. (In Russian)
- Kotov A.B., Shemyakin V.M., Sal'nikova E.B., Kovach V.P. (1999) Stage of formation and isotope structure of continental crust, Sutam block (Aldan shield): Sm-Nd systematics of granitoids. *Dokl. Akad. Nauk*, **366**(6), 809-812. (In Russian)
- Kuz'min M.I. (2014) Precambrian history of the origin and evolution of the Solar System and Earth]. Part 1. *Geodin. and tektonophys.*, **5**(3), 625-640. (In Russian)
- Kuz'min M.I., Yarmolyuk V.V. (2016) Changes in the manner of tectonic movements under the Earth's evolution. *Dokl. Earth Sci.*, **469**(2), 802-806.
- Lizuka T., Komiya T., Ueno Y., Katayama I., Uehara Y., Maruyama S., Hirata N., Johnson S.P., Dunkley D.J. (2007) Geology and zircon geochronology of the Acasta Gneiss Complex northwestern Canada: New constraints on its tectonothermal history. *Precambrian. Res.*, **153**, 179-208.
- Marakushev A.A. (1965) *Problema mineral'nykh fatsii metamorficheskikh i metasomaticheskikh gornykh porod* [Problem of mineral facies of metamorphic and metasomatic rocks]. Moscow, Nauka Publ., 327 p. (In Russian)
- Maslov A.V. (2007) Archean metaterrestrial rocks: Major geochemical constraints. *Geochemistry International*, **45**(4), 327-344.
- Matrenichev V.A., Lin'kova L.O., Levchenko O.A., Makeev A.F., Yakovleva S.Z., Alfimova N.A. (2005) Ancient crust of continental weathering of granites on the Baltic shield. *Dokl. Akad. Nauk*, **400**(1), 84-87. (In Russian)
- Mitrofanov F.P., Bayanova T.B. (2011) Eastern-Scandinavian Paeloproterozoic basite large igneous province (VSkBOIP – ESBLIP): geology, geodynamics, duration of formation. *Problemy pleit- i plyum-tectoniki v dokembrii. Materialy III Rossiiskoi konfrentsii po problemam tektoniki i geodinamiki dokembriya* [Problems of plate and plume tectonics in the Precambrian. Proc. III All-Russia Conference on problems of Precambrian tectonics and geodynamics]. IGGD RAS Publ., 118-120. (In Russian)
- Moorbath S., Whitehouse M.J., Kamber B.S. (1997) Exterme Nd-isotope heterogeneity in the early Archaean – fact or fiction? Case histories from northern Canada and West Greenland. *Chem. Geol.*, **135**, 213-231.
- Nebel O., Rapp R.P., Yaxley G.M. (2014) The role of detrital zircons in Hadean crustal research. *Lithos*, **190-191**, 313-327.
- Polynov B.B. (1934) *Kory vyvetrivaniya. P. 1. Protessy vyvetrivaniya: osnovnye fazy i formy vyvetrivaniya* [Weathering crusts. P. 1. Weathering processes: main phases and forms]. Leningrad, Akad. Nauk SSSR Publ., 210 p. (In Russian)
- Reimink J.R., Davies J.H.F.L., Chacko T., Stern R.A., Heaman L.M., Sarkar C., Schaltegger U., Creaser R.A., Pearson D.G. (2016) No evidence for Hadean continental crust within Earth's oldest evolved rock unit. *Nature geosci. Letters*. Advance online publ. Springer, 19 Sept., 1-7.
- Rudnick R.L., Gao S. (2003) Composition of the continental crust. *Treasureon Geochemistry* (Ed. D. Holland, K.K. Turekian). Amsterdam, Elsevier, V. 3. The crust. 1-64.
- Rytsk E.Yu., Makeev A.F., Kovach V.P., Bogomolov E.S., Fedoseenko A.M. (2009) Age of granitoids of junction zone of Baikal-Muya fold belt and Kalar metamorphic terrane. *Stratigr. Geol. Korrel.*, **17**(2), 38-46. (In Russian)
- Shatrov V.N., Voitsekhovkii G.V. (2009) The use of lanthanides for the reconstruction of Phanerozoic and Proterozoic sedimentation environments exemplified by sections in the cover and basement of the East European Platform. *Geochemistry International*, **47**(8), 758-776.
- Sirotnin V.I., Belyavtseva E.E. Lanthanoids as an indicator of the structure of the zone of free alumina in the lateritic weathering crust of the KMA. *Dokl. Earth Sci.*, **438**(1), 666-668.
- Skobelev V.M., Stepanyuk L.M., Verkhoglyad V.M. (2004) Geochronology of the Archean formations of the Canadian shield. *Minerlogicheskii zhurnal*, **26**(3), 133-145. (In Russian)
- Sobolev V.S. (1960) Conditions of diamond formation. *Geol. Geofis.*, (1), 8-11. (In Russian)
- Stacey J.S., Kamers J.D. (1975) Approximation of terrestrial lead isotope evolution by two-setage model. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **26**(2), 207-221.
- Stognii G.A., Stognii V.V. (2005) *Geofizicheskoe pole vostochnoi chasti Severo-Aziatskogo kratona* [Geophysical field of the eastern part of the North-Asian craton]. Yakutsk, Sakhapolografizdat Publ., 174 p. (In Russian)
- Taylor S.R., McLennan S.M. (1985) *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, Oxford, 312 p.
- Zhmodik S.M. (1979) Thorium-uranium ratio in weathering processes and its indicator role. *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, **247**, 1489-1493. (In Russian)