

УДК 550.41+550.42+553.065.2

## ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ РУДОПРОДУКТИВНОСТЬ ГРАНИТОИДОВ ГАРГАНСКОЙ ГЛЫБЫ (ВОСТОЧНЫЙ САЯН)

© 2019 г. С. В. Ефремов<sup>1,\*</sup>, С. И. Дриль<sup>1</sup>, Н. А. Горячев<sup>1,2</sup>, И. В. Левицкий<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения РАН  
Россия, 664033, Иркутск, Фаворского, 1а

<sup>2</sup>Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило  
Дальневосточного отделения РАН  
Россия, 685000, Магадан, Портовая, 16

\*E-mail: esv@igc.irk.ru

Поступила в редакцию 20.04.2018 г.

После доработки 21.01.2019 г.

Принята к публикации 27.02.2019 г.

В статье, на основе анализа современных генетических моделей, создан и апробирован алгоритм выделения производных потенциально рудоносных магм среди докембрийских пород тоналит-трондъемит-гранодиоритовых ассоциаций (ТТГА). Алгоритм реализован в виде последовательности геохимических критериев, позволяющих идентифицировать генетическую природу источников вещества и, на этой основе, выделять продукты плавления геохимических резервуаров, обогащенных Au и другими рудными элементами. Предложенный алгоритм (набор геохимических критериев потенциальной рудоносности) может быть использован при металлогеническом районировании территорий, сложенных породами ТТГА в пределах древних кратонов.

**Ключевые слова:** адакиты, ТТГА, золото, Восточный Саян, Гарганская глыба

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0016-777061461-71>

### ВВЕДЕНИЕ

Оценка потенциальной рудоносности и рудной продуктивности производных кислых и средних магм в отношении золота и тяжелых металлов с использованием геохимических данных по сей день остается задачей, не имеющей однозначного решения. Вызвано это, в первую очередь, разнообразием генетических типов золотой минерализации, отсутствием информации о первичном источнике золота и тяжелых металлов и недостаточным объемом знаний о поведении рассматриваемых рудных элементов в магматической системе.

В настоящее время известны два типа средних и кислых магм (адакиты, санукитоиды), с производными которых генетическая связь месторождений золота и тяжелых металлов более или менее доказана (Gonzalez-Partida *et al.*, 2003; Hou *et al.*, 2004; Thieblemont *et al.*, 1997; Wang *et al.*, 2006), и появление подобных пород в районах поисков может рассматриваться как благоприятный металлогенический признак. Наряду с этим, существует еще одна группа пород, генетически близкая к санукитоидам и адакитам, с проявлениями которой может быть связана золотая минерализация. Это породы тоналит-трондъемит-гранодиоритовой ассоциации (ТТГА), слагающие фундамент древних кратонов.

Учитывая то, что формирование магматических тел, сложенных производными ТТГ-магм, происходило в высокоградиентных *PT*-условиях (Martin *et al.*, 2014; Moyn, Martin, 2012), а основная масса этих пород сформировалась существенно раньше основной массы древних золоторудных месторождений, говорить о развитии рудно-магматической системы в классическом понимании не представляется возможным. Однако можно говорить о геохимической специализации расплава/горной породы в отношении золота, выраженной в обогащении этим элементом. Иными словами, породы ТТГА могут рассматриваться в качестве источника золота (“первичного коллектора”), которое может быть извлечено из них и переотложено при интенсивных эндогенных преобразованиях (магматизм, метаморфизм) последующих геологических эпох.

Значительная распространенность пород ТТГА в пределах щитов древних платформ открывает широкие перспективы для поисков золота и тяжелых металлов в границах их распространения при условии проявления более поздних тектономагматических процессов. Однако для реализации этого критерия нет простых решений. Связано это с тем, что породы ТТГА генетически неоднородны, и к потенциально рудоносным могут быть

отнесены не все их группы. Следовательно, для более корректного выбора площадей, перспективных в отношении рудной минерализации в пределах геологических блоков, сложенных породами ТТГ-ассоциаций, нам необходимы критерии их потенциальной рудоносности.

Именно создание критериев потенциальной рудоносности пород ТТГ-ассоциаций древних кратонов является главной целью исследования, первые результаты которого приведены в данной статье.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННЫХ ЗАДАЧ

В основе предложенного методического подхода лежит разделение магматических пород на генетически однородные группы по их геохимическим и изотопным характеристикам. Для более корректного изложения материала был использован принцип аналогии в отношении генезиса пород докембрийских ТТГА и современных ТТГА и адацитов, примененный многими авторами для расшифровки процессов становления древней континентальной коры (Condie, 2005; Martin, 1999). Этот подход вполне логичен, так как модели обогащения источников вещества профилирующими рудными элементами созданы только для современных адацитов, а сами источники доступны для изучения.

Схожесть пород выделенных групп обусловлена тем, что их образование связывают с плавлением гидратированного базитового протолита в области стабильности эклогитовых парагенезисов. Это позволяет не отвлекаться на решение геодинамических проблем, сосредоточившись на условиях магмогенерации и составе источника магм.

Производные современных адацитовых и ТТГ-магм известны только в пределах современных островных дуг и активных континентальных окраин (Condie, 2005). Они довольно близки по геохимической характеристике (Martin, 1999), однако отличаются по местоположению и составу источников вещества.

Адакиты (подразумеваются высококремнистые адакиты (HSA) по (Martin *et al.*, 2005)) образуются за счет плавления пород базальтового слоя субдуцирующей океанической литосферы. При этом следует отметить, что породы базальтового слоя океанической коры подверглись гидротермальным преобразованиям в срединно-океанических хребтах (Alt *et al.*, 1996; Bach, Irber, 1998; Kelley *et al.*, 2003; Staudigel *et al.*, 1995) и морскому выветриванию на пелагических равнинах (Jochum, Verma, 1996; Kelley *et al.*, 2003; Staudigel *et al.*, 1995). В связи с этим они обогащены щелочными и щелочноземельными элементами, легкими редкоземельными элементами (LREE), рудными элементами, ураном,

ториумом и свинцом (Ефремов, 2012). То есть мы имеем дело с уже обогащенным источником вещества, способным генерировать геохимически специализированные, потенциально рудоносные магмы.

Современные ТТГ-магмы образуются в результате плавления базитовых пород в подошве мощной континентальной коры, нарощенной по модели андэплэтинга (Petford, Atherton, 1996). При этом базальтовые магмы, “подстилающие” континентальную кору, образуются за счет плавления пород деплетированной верхней мантии и обеднены большинством мобильных и рудных элементов. Иными словами, мы имеем истощенный источник вещества, связь с которым потенциально рудоносных магм маловероятна.

В целом, сопоставляя современные адакиты и ТТГ, мы приходим к широко известным “слэбовой” и “коровой” моделям, позволяющим разделять производные магм, сгенерированных в этих условиях, по параметрам магмогенерации и составу протолита. Учитывая особенности плавления базитового источника при различных давлениях, мы довольно уверенно можем отделить производные высокобарических слэбовых магм от менее барических нижнекоровых, используя типовые классификационные диаграммы для адацитов и ТТГ, в координатах Sr/Y — Y (Defant, Drummond, 1990) и La/Yb<sub>N</sub> — Yb<sub>N</sub> (Martin, 1999).

Разделение продуктов плавления истощенного и обогащенного источников вещества также не вызывает особых затруднений и может быть выполнено как по повышенным концентрациям мобильных и рудных элементов, так и по их соотношениям. Таким образом, используя критерии, характеризующие уровень магмогенерации и обогащение источника магм рудными и мобильными элементами, мы довольно легко можем выделить производные потенциально рудоносных магм среди современных адацитов и ТТГА.

Все это можно сказать и о докембрийских ТТГА. Полный обзор по эволюции системы взглядов относительно генезиса докембрийских ТТГА (далее ТТГА) изложен в работе (Moyen, Martin, 2012).

Согласно представлениям (Halla *et al.*, 2017), породы ТТГА также делятся на две группы: низкобарические (LP, умеренные LREE/HREE, умеренные Sr/Y отношения) и высокобарические (HP, низкие LREE/HREE, высокие Sr/Y отношения), что, в рамках современных генетических моделей, может быть поставлено в соответствие рассмотренным выше коровой и слэбовой моделям. Однако при этом следует учитывать специфику геодинамического развития Земли на ранних этапах ее эволюции.

Эта “специфика” является крайне дискуссионной и связана с определением рубежа, начиная с которого для объяснения геодинамических собы-

**Таблица 1.** Геохимическая характеристика ТТГА Гарганской глыбы

Оксид/ Элемент	BC-57	BC-61	BC-62	BC-56	BC-66	Мо- дельный состав	Оксид/ Элемент	BC-57	BC-61	BC-62	BC-56	BC-66	Мо- дельный состав
SiO <sub>2</sub>	65.53	66.23	68.34	70.66	74.1	н.д.	Ta	0.45	0.22	0.42	0.61	0.09	0.11
TiO <sub>2</sub>	0.45	0.47	0.3	0.32	0.14	0.22	Zr	187	186	150	165	119	122
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.33	15.83	16.39	15.56	14.39	н.д.	Hf	3.9	3.6	2.8	2.8	2.3	3.0
FeO	2.39	2.39	1.56	1.3	0.63	н.д.	Y	6.4	4.9	3.8	1.3	2.5	4.5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.39	1.34	1.05	1.02	0.63	н.д.	Co	10	10	7	4	2	н.д.
MnO	0.05	0.05	0.03	0.04	0.02	н.д.	Cr	24	23	13	н.д.	2	н.д.
MgO	1.8	1.48	0.88	0.75	0.39	н.д.	Ni	13	11	6	5	4	н.д.
CaO	3.61	3.22	2.05	2.09	1.42	н.д.	V	82	55	38	22	10	н.д.
Na <sub>2</sub> O	5.44	4.69	5.43	5.11	5.56	н.д.	Ga	20	21	22	18	17	н.д.
K <sub>2</sub> O	1.41	1.98	2.06	1.66	1.45	0.26	Ge	0.9	0.9	1	0.7	0.8	н.д.
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.14	0.14	0.1	0.09	0.03	0.30	La	23	46	18	12	19	5
ппп	1.11	1.85	1.65	1.05	1.04	н.д.	Ce	42	79	30	20	34	11
Сумма	99.65	99.67	99.83	99.66	99.8	н.д.	Pr	4.1	7.4	2.8	1.8	3.3	1.5
Li	20	64	36	15	13	н.д.	Nd	15	25	10	7	11	6.4
Rb	51	107	119	30	42	2.7	Sm	2.4	3	1.2	1	1.5	1.4
Cs	1.8	4.6	4	1.7	0.8	0.03	Eu	0.8	0.9	0.6	0.5	0.5	0.6
Ba	921	1257	1116	800	906	25	Gd	2.3	2.6	1.3	1	1.4	1.2
Sr	666	626	463	619	445	229	Tb	0.26	0.24	0.13	0.06	0.13	0.16
B	20	39	52	42	11	н.д.	Dy	1.5	1.2	0.8	0.3	0.6	0.8
Be	2	0.9	1.2	0.8	0.8	н.д.	Ho	0.27	0.2	0.13	0.05	0.11	0.15
F	340	980	430	300	280	н.д.	Er	0.7	0.5	0.5	0.1	0.3	0.4
Cu	9.3	5.1	8.4	9.1	10.6	н.д.	Tm	0.08	0.06	0.05	0.02	0.03	0.05
Zn	71	91	57	35	27	н.д.	Yb	0.6	0.39	0.3	0.14	0.23	0.32
Pb	13	12	8	11	12	1.3	Lu	0.07	0.05	0.04	0.02	0.03	0.05
Sn	1	1.3	1	0.4	0.8	н.д.	Th	1.7	2.5	1.9	1.1	1.9	0.5
W	0.05	0.1	0.08	н.д.	0.15	н.д.	U	0.24	0.38	1.29	0.15	0.5	0.2
Mo	0.7	0.4	0.2	н.д.	0.4	н.д.	Au	0.005	0.03	0.012	0.006	0.016	н.д.
Nb	1.2	2.8	5	1.4	2.7	3.3							

Примечание. BC-57, BC-61, BC-62 — тоналиты. BC-56, BC-66 — трондjemиты. Модельный состав ТТГА рассчитан при плавлении протолита с составом N-MORB, в условиях стабильности эклогитового парагенезиса минералов. Параметры плавления, ассоциация реститовых фаз и методика расчета были взяты из работы (Martin и др., 2014), коэффициенты распределения из работы (Bedard, 2006). Анализы выполнены в ЦКП «изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН. Петрогенные элементы — РФА. Li, Au — атомная адсорбция. Остальные элементы ICP-MS. Н.д. — нет данных.

тий может быть использована гипотеза тектоники литосферных плит (слэбовая модель). Наиболее простым способом выделения этого рубежа является поиск и датирование магматических пород, фиксирующих рециклинг вещества верхней континентальной коры в зоне субдукции. Этим рубежом является датировка 3.1 млрд лет, полученная по санукитоидам (Halla *et al.*, 2017). Таким образом, слэбовая модель может быть применена к породам НР-группы ТТГА с возрастом не древнее 3.1 млрд лет.

В целом, для решения задач оценки потенциальной рудоносности производных магм ТТГА использование геодинамических построений не

является критичным. Необходимо просто оценить глубину генерации инициальных магм и степень обогащения их протолита рудными и мобильными элементами. Если первая задача легко решается при геохимической типизации пород ТТГА, то подход к решению второй требует некоторых пояснений.

Дело в том, что часть исследователей рассматривает в качестве протолита для ТТГА базальты океанических плато с составом E-MORB или T-MORB (Martin *et al.*, 2014). В рамках использованного подхода, этот источник также является обогащенным, однако для него не свойственна специализация на золото и тяжелые металлы.

Следовательно, для достижения поставленной задачи нам необходимо выявить не только обогащение профилирующими химическими элементами источника магм ТТГА, но и зафиксировать его генетическую природу. Это возможно сделать при изучении причин, ответственных за обогащение источника.

Океаническая кора имеет два обогащенных геохимических резервуара: осадочный слой и АОС (altered oceanic crust / измененная океаническая кора), имеющих различные геохимические характеристики.

В настоящее время присутствие осадочного вещества в источнике генерации магм может быть легко выявлено по высоким концентрациям K, Li, Rb, Cs, Ba, Sr, LRE элементов, Pb, U, Th в продуктах его плавления, высоким и низким величинам известных элементных соотношений, таких как Th/La, Ce/Pb, Nd/Pb, В/Ве и др. (Plank, 2005)<sup>1</sup>.

Состав базальтов АОС также зависит от нескольких факторов. По современным данным, в вертикальном разрезе коры выделяются четыре зоны, сложенные горными породами с устойчивыми геохимическими характеристиками (Alt, Emmermann, 1983). Первая и вторая (сверху) — зоны морского выветривания. Они образуются при взаимодействии базальтов океанического дна с морской водой, и это взаимодействие имеет геохимические следствия. Отмечается существенный рост концентраций K, Cs, Rb, Ba, Th, U, Pb, LREE, рост  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  и снижение  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  соотношений (Jochum, Verma, 1996; Kelley *et al.*, 2003; Staudigel *et al.*, 1995).

Третья и четвертая — зоны средне- и высокотемпературных гидротермальных преобразований. Четвертая зона является зоной выноса, а третья — зоной привноса одной и той же ассоциации элементов (Rb, Ba, K, Th, U, Pb, Ni, Zn, Cu, Nb, Ta, Zr, Hf) (Alt и Emmermann, 1983; Alt *et al.*, 1996; Autio *et al.*, 1989; Emmermann, 1983; Kepezhinskas *et al.*, 1995; Shimizu *et al.*, 1989; Sparks, 1995; Zuleger *et al.*, 1995; Zuleger *et al.*, 1996).

Таким образом, для океанической коры в целом (вне зависимости от присутствия осадочного слоя) наблюдается привнос и фракционирование мобильных и рудных элементов. Сама по себе ассоциация элементов привноса мало чем отличается от ассоциации обогащения базальтов E-MORB или T-MORB относительно N-MORB, однако в ее пределах наблюдается фракционирование пар химических элементов, нетипичное для продуктов плавления первичных геохимических резервуаров (LILE/HFSE; LREE/HFSE, HFSE/HFSE). Им также свойственны более высокие  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  и

более низкие  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  изотопные отношения, а подвижность U, Th и Pb должна найти отражение в изотопии Pb.

Учитывая вышесказанное, разделение производных магм ТТГА по генетическому типу источников вещества (MORB, АОС, осадочный слой) не вызовет значительных затруднений. Оно может быть выполнено с помощью бинарных геохимических и изотопных диаграмм в координатах элементных и изотопных соотношений, с нанесенными полями и линиями эволюции составов геохимических резервуаров и продуктов их плавления. Любое отклонение от этих зависимостей может рассматриваться как нарушение условия закрытости системы (привнос вещества из генетически чуждого источника).

В целом, алгоритм выделения среди пород ТТГА потенциально рудоносных может выглядеть следующим образом<sup>2</sup>:

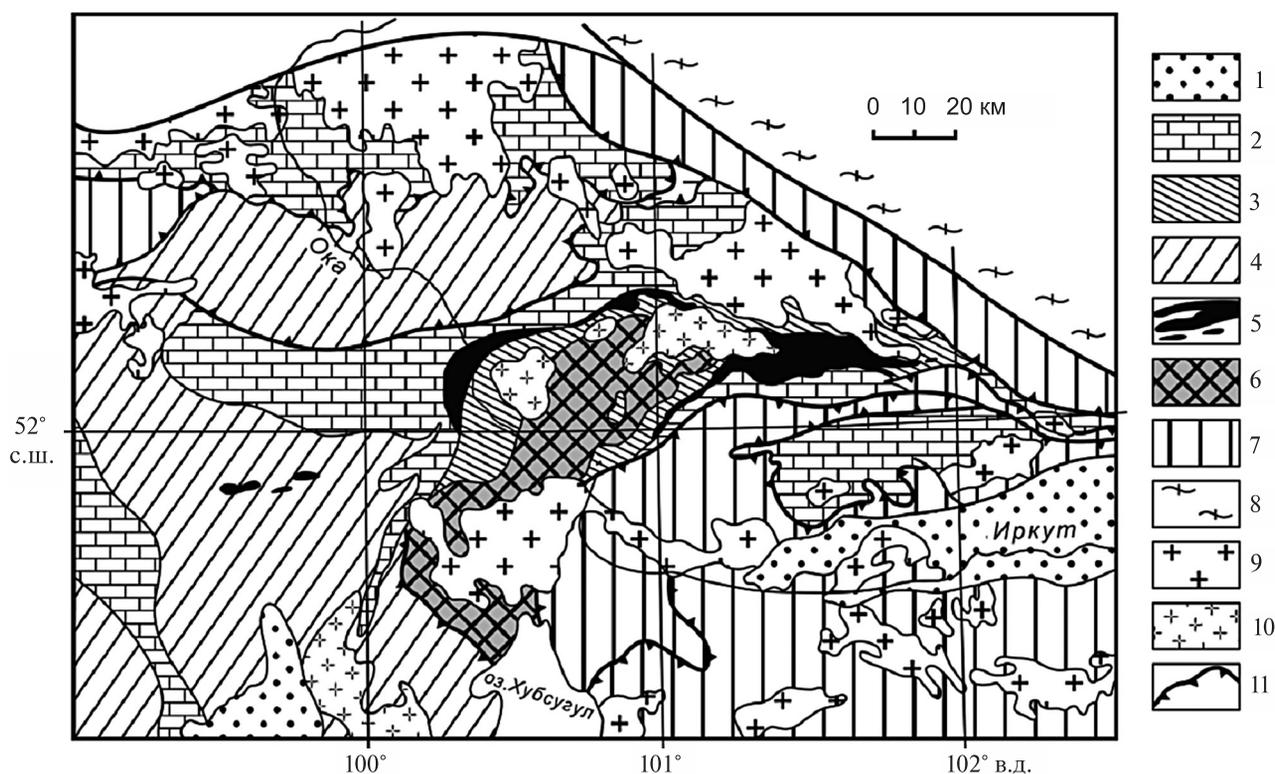
- Геохимическая типизация (разделение ТТГА на низко- и высокобарические);
- Оценка степени обогащения мобильными и рудными элементами;
- Разделение производных магм ТТГА по генетическому типу источников вещества, с использованием геохимических и изотопных данных.

<sup>2</sup> Практическая реализация этого алгоритма может выглядеть следующим образом. Для разделения пород ТТГА на низко- и высокобарические можно использовать классификационные диаграммы из работ, приведенных в списке литературы (Halla *et al.*, 2017; Moyen, Martin, 2012).

Оценка степени обогащения мобильными элементами может быть выполнена с использованием модельного состава, рассчитанного при плавлении толеитового базальта с характеристикой N-MORB. Этот состав добавлен в таблицу 1. Сравнивая на спайдер-диаграмме геохимические спектры ТТГА и модельного состава, можно визуально оценить степень обогащения той или иной группой химических элементов. Другим вариантом решения этой задачи может быть сравнение изучаемых составов пород со спектром среднего состава высокобарических ТТГА по (Halla, и др. 2017; Moyen, Martin, 2012), которые «априори» образуются за счет обогащенного источника вещества (Martin *et al.*, 2014).

Разделение производных ТТГА по генетическому типу источников вещества возможно с помощью диаграмм, приведенных в тексте на фиг. 4. Эти диаграммы дают возможность говорить о том, являются ли источником вещества производных магм ТТГА базиты, образовавшиеся за счет плавления деплетированной (MORB)/неистощенной (OIB) мантии, или породы АОС. Во втором случае мы можем выделить продукты плавления различных зон АОС, обладающих разным «рудным потенциалом». Положение точек составов около линии минерализованной зоны свидетельствует об образовании производных магм ТТГА за счет плавления источника, обогащенного Cu, Mo, Fe, Pb, Zn, Au, Ag, и позволяет рассматривать их в качестве потенциально рудоносных.

<sup>1</sup> Величины этих элементных соотношений изменяются незначительно при генерации и эволюции магм и, таким образом, характеризуют источник вещества.



**Фиг. 1.** Геологическое строение северо-восточной части Тувино-Монгольского массива и его обрамления (Беличенко и др.).

1 – кайнозойские отложения; 2 – отложения венд-кембрийского чехла; 3–5 – рифейские образования: 3 – отложения рифейского чехла, 4 – осадочные и осадочно-вулканогенные отложения, 5 – офиолиты; 6 – раннедокембрийский фундамент (Гарганская глыба); 7 – ордовикское складчатое обрамление; 8 – фундамент Сибирской платформы; 9 – раннепалеозойские гранитоиды; 10 – вендские гранитоиды; 11 – границы покровов.

Апробация этого подхода была выполнена на примере пород ТТГА Гарганской глыбы (Восточный Саян), результаты этих работ приведены в следующем разделе статьи.

#### ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Гарганская глыба расположена в верховьях рек Иркут, Китой, Ока, левых притоков р. Ангара (фиг. 1). Она представляет собой фрагмент «серогнейсового» фундамента Тувино-Монгольского микроконтинента, аккрецированного к Сибирской платформе в раннепалеозойское время (Котов и др., 1997). Глыба имеет типичный для серогнейсовых террейнов литологический состав, включающий в себя породы ТТГА, калиевые гранитоиды и амфиболиты. Для пород ТТГА глыбы был определен изотопный U/Pb возраст по циркону, который составил  $2727 \pm 6$  млн лет (Анисимова и др., 2009).

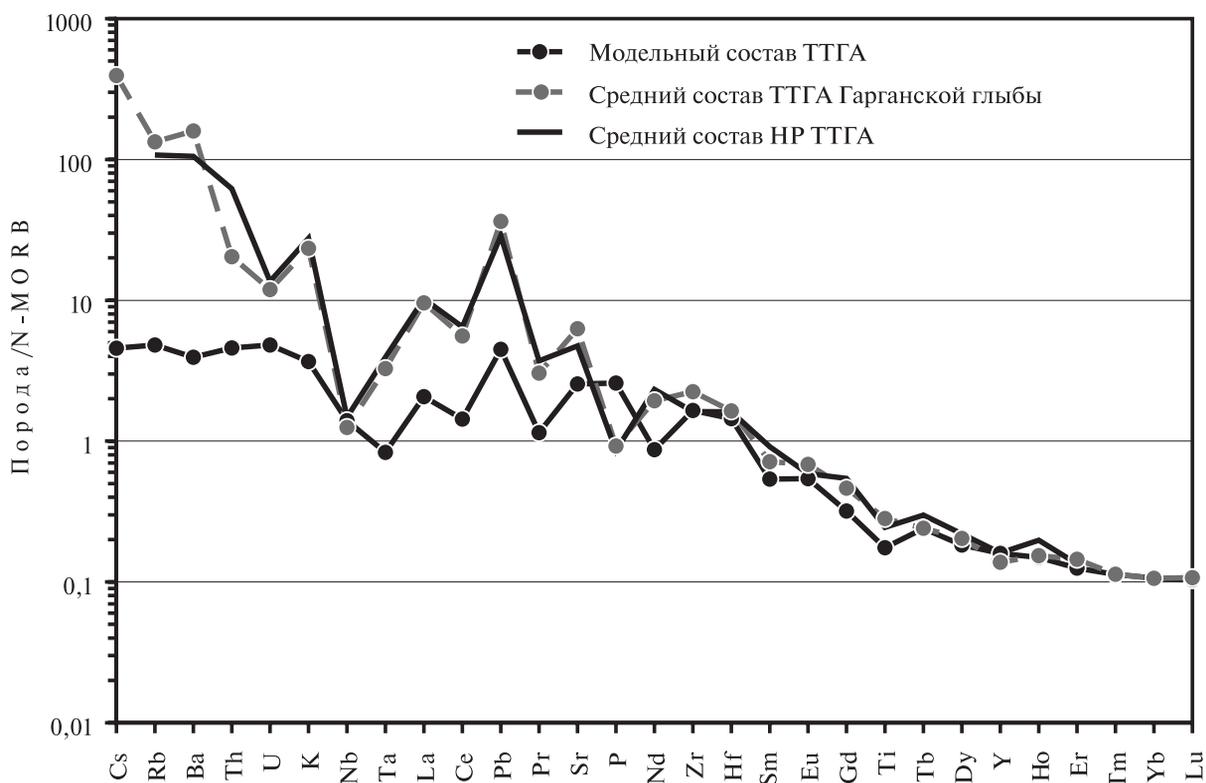
Важной особенностью Гарганской глыбы является «пространственный» контроль большинства объектов Au-минерализации в восточной части Восточного Саяна (Ефремов, Митичкин, 2000). Эти объекты (месторождения, рудопроявления,

точки минерализации) расположены либо в пределах Гарганской глыбы, либо в геологических толщах, сложенных продуктами ее дезинтеграции. Все это позволяет рассматривать серые гнейсы в качестве первичного коллектора/первичного источника Au для более молодых рудных объектов.

Геохимическая характеристика пород ТТГА Гарганской глыбы приведена в табл. 1. Как и всем породам ТТГА, им свойственны повышенные концентрации глинозема, значительное преобладание натрия над калием (от 2.5 до 4), повышенные магнезиальность ( $Mg\# = 0.4-0.5$ ), концентрации Sr, LRE-элементов. Отмечаются невысокие концентрации Y, Yb и других HRE-элементов. Заметно повышены концентрации золота.

В целом, на основании большинства классификационных признаков, они соответствуют низкокремнистым высокобарическим (НР) породам ТТГА (Moyen, Martin, 2012), либо низко HREE ТТГА по (Halla *et al.*, 2017). Это наглядно иллюстрируют диаграммы, приведенные на фиг. 2, где помимо среднего состава пород ТТГА Гарганской глыбы приведен средний состав НР ТТГА.

Для иллюстрации степени обогащения мобильными и рудными элементами пород ТТГА Гарганской глыбы был рассчитан модельный состав



**Фиг. 2.** Геохимическая характеристика пород ТТГА Гарганской глыбы.

Средний состав НР ТТГА из работы (Moyen, Martin, 2012). Средний состав ТТГА Гарганской глыбы рассчитан по данным из табл. 1. Модельный состав ТТГА рассчитан при плавлении протолита с составом N-MORB, в условиях стабильности эклогитового парагенезиса минералов. Параметры плавления, ассоциация реститовых фаз и методика расчета были взяты из работы (Martin *et al.*, 2014), коэффициенты распределения из работы (Bedard, 2006).

тоналита, полученный при плавлении протолита с составом N-MORB, в условиях стабильности эклогитового парагенезиса минералов. Параметры плавления, ассоциация реститовых фаз и методика расчета были взяты из работы (Martin *et al.*, 2014)<sup>1</sup>, коэффициенты распределения из работы (Bedard, 2006). Геохимический спектр модельного состава тоналита приведен на фиг. 2.

Как наглядно иллюстрирует фиг. 2, относительно модельного состава тоналита породы ТТГА Гарганской глыбы значительно обогащены Cs, Rb, Ba, Sr, Th, U, Pb, LREE, Ta. При этом отмечается фракционирование элементов, таких как Th/Ba, Th/K, U/Ba, U/K, LREE/Pb, LREE/LILE, LREE/HFSE, Nb/Ta, что позволяет использовать изложенный в предыдущем разделе методический подход для генетических реконструкций.

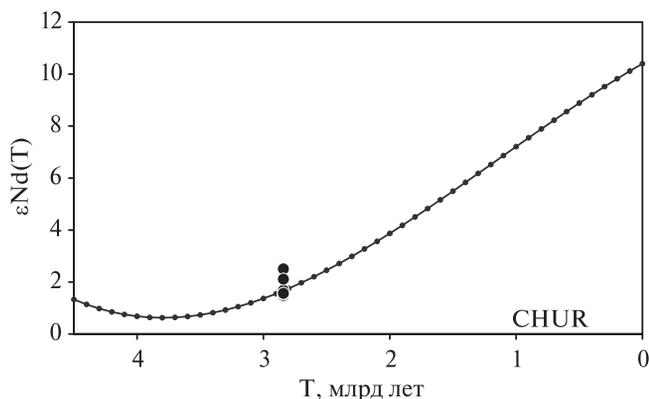
В контексте генетической модели, декларируемой в работе (Martin *et al.*, 2014), обогащение мобильными элементами пород ТТГА Гарганской глыбы должно быть связано с составом протолита.

<sup>1</sup> В данной работе ассоциация реститовых фаз рассчитывалась для среднего состава НР ТТГА. Довольно хорошее совпадение геохимического спектра ТТГА Гарганской глыбы со средним составом НР ТТГА позволяет использовать эту ассоциацию для наших расчетов.

При этом ассоциация элементов «привноса» не позволяет однозначно определить причину обогащения, так как их повышенные концентрации свойственны многим геохимическим резервуарам (продукты плавления неистощенной мантии, континентальная кора, породы осадочного слоя океанической коры и др.) и требует использования иных методических подходов, в частности, изотопно-геохимических. Изотопная характеристика серых гнейсов Гарганской глыбы приведена в табл. 2 и на фиг. 3.

Для иллюстрации особенностей изотопного состава серых гнейсов была использована диаграмма в координатах  $\epsilon\text{Nd}(T) - T$ . Расчет величин  $\epsilon\text{Nd}(T)$  производился с использованием Sm/Nd изохронной датировки  $2842 \pm 82$  млн лет (Инициальное  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.509041 \pm 0.000068$ ; MSWD = 4.5), полученной по анализам пород из табл. 2. Близость U/Pb ( $2727 \pm 6$  млрд лет (Анисимова и др., 2009)) и Sm/Nd датировок и соответствие изотопных характеристик пород изохронной модели свидетельствует о ненарушенности Sm/Nd изотопной системы и дает возможность использовать эти данные для генетических построений.

На диаграмме фиг. 3 точки составов пород ТТГА Гарганской глыбы лежат выше линии



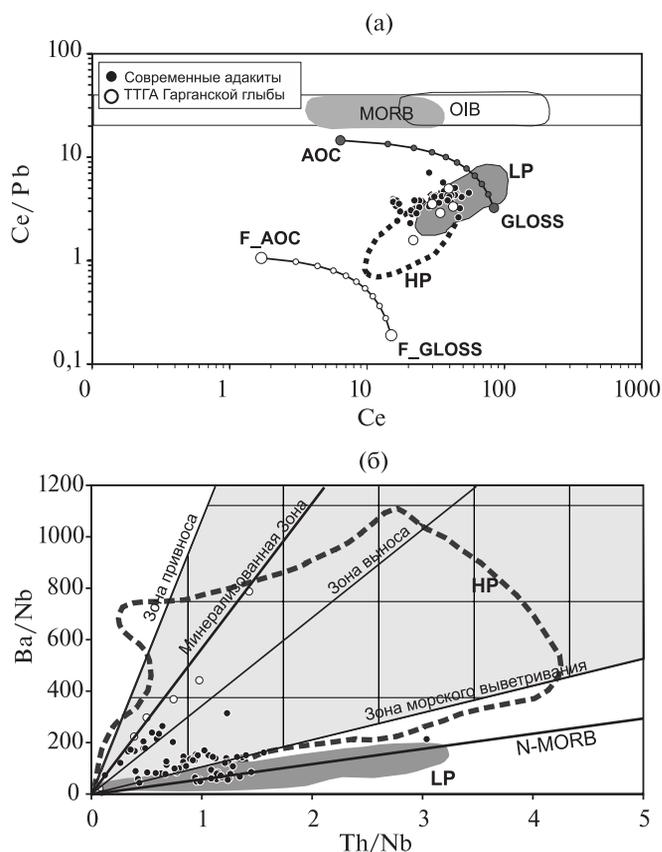
Фиг. 3. Диаграмма  $\epsilon Nd(T) - T$ .

Сплошная линия – эмпирическая линия эволюции верхней мантии, рассчитанная с шагом 100 млн лет по уравнению  $\epsilon Nd(T) = 0.164T^3 - 0.566T^2 - 2.79T + 10.4$  из работы (Nagler, Kramers, 1998). Точками даны составы серых гнейсов из табл.2. CHUR – однородный хондритовый резервуар.

CHUR, в поле положительных значений  $\epsilon Nd(T)$ , на линии эволюции верхней мантии, либо выше нее. Это позволяет говорить о том, что их протолит образовался за счет плавления деплетированного мантийного источника и, с большой долей вероятности, о том, что обогащение мобильными элементами не является первичной характеристикой этого источника вещества.

Учитывая то, что возраст пород ТТГА Гарганской глыбы менее 3.1 млрд лет, мы можем использовать слэбовую модель для расшифровки их генетических особенностей. Для последующих генетических построений с использованием геохимических данных, в качестве геохимических резервуаров/источников вещества были взяты составы, характеризующие истощенную (N-MORB) и неистощенную (OIB) мантию (Mc Donough, Sun, 1995), оценки состава океанической литосферы (зона гидротермальных преобразований (Ефремов, 2012), зона морского выветривания (Kelley *et al.*, 2003), осадочный слой (GLOSS (Plank, Langmur, 1998))). Помимо этого, для расшифровки причин эволюции составов пород ТТГА использовались базы данных: по породам ТТГА мира (Moyen, Martin, 2012), содержащая 1750 анализов этих пород, и по современным адакитам Андийской континентальной окраины, содержащая 202 анализа из работ (Beate *et al.*, 2001; Bourdon *et al.*, 2002; Bryant *et al.*, 2006; Gonzalez-Partida *et al.*, 2003; Ickerta *et al.*, 2009; Samaniego *et al.*, 2005).

Пары элементов для построения диаграмм отбирались с учетом невозможности их фракционирования друг относительно друга в магматическом процессе, что позволяет фиксировать по их соотношению генетическую природу источника вещества (Ce-Pb, Nb-Ta, Th-U, Th-La, Th-Ba, Th-Pb). Из списка также были исключены эле-



Фиг. 4. Диаграммы Ce/Pb – Ce (а) и Ba/Nb – Th/Nb (б).

Диаграмма Ce/Pb – Ce построена на базе аналогичной диаграммы из работы (Brenan, 1995). MORB и OIB – поля составов базальтов MORB/истощенный и OIB/неистощенный мантийный источник адакитов и ТТГ, поля составов пород HP (высокобарические) и LP (низкобарические) ТТГА, составы AOC (Ефремов, 2012) и GLOSS (Plank и Langmur 1998), составы флюидов, выделившихся при дегидратации базальтового (F\_AOC) и осадочного (F\_GLOSS) слоев океанической литосферы (Ефремов, 2012). Также на диаграммах приведены точки составов современных адакитов и пород ТТГА Гарганской глыбы.

Диаграмма Th/Nb – Ba/Nb. Поле эволюции составов LP ТТГА дано серым цветом. Пунктирной линией ограничено поле вариации составов HP ТТГА. Вариации составов AOC – серое поле с квадратной сеткой. Линии равных отношений Ba/Th для оценок составов зон AOC (Ефремов, 2012): зона морского выветривания совпадает с GLOSS); зона привноса; зона выноса; минерализованная зона. N-MORB – линия равных отношений Ba/Th в базальтах N-MORB (совпадает с OIB).

менты, концентрации которых сильно варьируют при изменении *PT*-условий генерации магм (Sr, MREE, HREE, Y).

Для иллюстрации генетических построений в статье на фиг.4 приведены две диаграммы Ce/Pb – Ce и Th/Nb – Ba/Nb. Диаграмма Ce/Pb – Ce построена на базе аналогичной диаграммы из работы (Brenan, 1995). На ней приведе-

**Таблица 2.** Изотопная характеристика серых гнейсов Гарганской глыбы

Проба	Порода	C <sub>Nd</sub>	C <sub>Sm</sub>	<sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	±2s	εNd(0)	t	εNd(t)	<sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd (t)
BC-57	гранитогнейс	14.9	2.4	0.09822	0.510867	9	-34.54	2842	1.49	0.509025
BC-62	гранитогнейс	8.2	1.1	0.08129	0.510560	10	-40.53	2842	1.70	0.509035
ГА-33	гранитогнейс	25.0	2.9	0.07101	0.510360	6	-44.44	2842	1.55	0.509028
BC-63	амфиболит	3.9	1.2	0.19171	0.512652	5	0.28	2842	2.12	0.509056
BC-69	гранитогнейс	5.2	1.5	0.17458	0.512303	5	-6.54	2842	1.56	0.509028
BC-61	амфиболит	21.3	2.6	0.07559	0.510495	4	-41.81	2842	2.51	0.509076

Примечание. Анализы выполнены в ЦКП «изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН.

Методика и метрология измерения изотопного состава Nd разработана в лаборатории геохимии изотопов ИГХ СО РАН с применением изотопного трассера. Выделение чистых фракций неодима проводилось с использованием ионообменных смол BioRad AG-50Wx12 200–400 меш для выделения суммы редких земель и LN-Eicrome для выделения чистых фракций неодима и самария по принятым методикам (Yang *et al.*). Для определения изотопного состава неодима и концентраций неодима и самария применялся метод двойного изотопного разбавления с использованием смешанного трассера <sup>149</sup>Sm + <sup>150</sup>Nd. Измерения проводились на 9-коллекторном MC-ICP-MS Neptune Plus в статическом режиме. Изобарная интерференция <sup>144</sup>Sm на <sup>144</sup>Nd была всегда менее 10 ppm.

Измерения изотопного состава и концентраций в стандартных образцах дали следующие результаты: BCR-2 (n = 28) – <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.512630 ± 14; Nd = 28.77 ± 0.13 ppm; Sm = 6.52 ± 0.03 ppm; AGV-2 (n = 8) – <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.512769 ± 16; Nd = 30.3 ± 0.02 ppm; Sm = 5.42 ± 0.03 ppm. Погрешности определения отношений <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd и <sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd, принятые при расчете параметров изохроны, составили 0/003% и 0/4% соответственно.

Дополнительно в выборку включена проба ГА-33, аналогичная по составу BC-56 (табл. 1), отобранная из того же обнажения.

ны поля составов базальтов MORB и OIB – предполагаемый истощенный и неистощенный мантийный источник адакитов и ТТГ, поля составов пород HP и LP ТТГА, составы АОС (Ефремов, 2012) и GLOSS (Plank, 1998), составы флюидов, выделившихся при дегидратации базальтового (F-АОС) и осадочного (F\_GLOS) слоев океанической литосферы (Ефремов, 2012). Также на диаграммах приведены точки составов современных адакитов и пород ТТГА Гарганской глыбы.

В отношении адакитов диаграмма иллюстрирует невозможность получения их вещественной характеристики без участия вещества осадочной природы в их источнике. Эволюция составов адакитов может быть объяснена с позиции разной степени плавления<sup>1</sup> протолита, содержащего около половины Pb и Ce осадочной природы, добавленной к АОС<sup>2</sup>. Аналогичные выводы могут быть сделаны и в отношении пород HP и LP ТТГА, образующих линейно вытянутые поля составов, перекрывающиеся с полем составов ада-

китов. Несовпадение направлений линий трендов, скорее всего, связано с отличием составов оценок современных АОС и GLOSS от таковых для Архейского эона.

В целом диаграмма показывает, что как адакиты, так и ТТГА образовались из обогащенного источника вещества, и это обогащение имеет «осадочную природу». Они не могут быть получены при плавлении производных первичных мантийных резервуаров (MORB, OIB). Точки составов пород ТТГА Гарганской глыбы попадают в поле составов HP ТТГА, что подтверждает корректность сделанных выводов об отнесении их к этой группе пород и свидетельствует о возможности их образования при плавлении океанической литосферы в зоне субдукции.

Диаграмма Th/Nb – Ba/Nb была дополнена полями составов современной океанической коры, пород HP и LP ТТГА, линиями равных отношений Ba/Th для оценок составов выделенных по генетическому признаку зон океанической коры (см. предыдущий раздел), продуктов плавления первичных мантийных резервуаров.

В качестве основы для генетических реконструкций нанесены точки составов современных адакитов. Как иллюстрирует диаграмма, единый массив данных “распался” на три скопления точек, имеющих линейную форму, тяготеющих к определенным линиям равных отношений Ba/Th. Подобное положение точек может быть интерпретировано с позиций пространственного местоположения и состава источников вещества для производных адакитовых магм.

<sup>1</sup> В данном случае смесь F-АОС – F-GLOS можно рассматривать как точку, к которой будет двигаться состав расплава при снижении степени плавления.

<sup>2</sup> Согласно данным (Jochum, Verma, 1996; Kelley *et al.*, 2003; Staudigel *et al.*, 1995), при формировании АОС просачивающаяся морская вода находится в равновесии с осадочными породами, перекрывающими океаническую плиту, и поэтому вещество из осадочной породы обогащает измененную океаническую кору рядом химических элементов, в частности Pb и Ce. Как иллюстрирует фиг. 4а, эта добавка может достигать 50% от общей массы Pb и Ce в АОС.

Первый массив данных тяготеет к линии эволюции составов продуктов плавления деплетированного мантийного источника, к этой же линии тяготеет поле составов пород LP TTGA. В данном случае, для объяснения генетической природы инициальных магм может быть использована коровая генетическая модель (плавление истощенного источника в подошве мощной континентальной коры).

Два остальных облака точек составов расположены в поле эволюции составов океанической коры. Первый из двух массивов данных тяготеет к линии эволюции составов, образующихся при плавлении базальтов морского дна, подвергшихся морскому выветриванию. Второй массив данных расположен в поле составов гидротермально измененных базальтов морского дна, в области между линиями равных отношений Ва/Th оценок средних составов минерализованной зоны и зоны выноса.

Минерализованная зона – это область максимального обогащения рудными элементами, формирующаяся при кристаллизации сульфидных минералов в результате сброса рудной нагрузки гидротермальными флюидами при встрече с просачивающимися холодными морскими водами (Alt, Emmermann, 1983; Emmermann, 1983), и ее положение между линиями, характеризующими зону привноса и зону морского выветривания, вполне закономерно.

Магмогенерация именно в этой части океанической коры будет приводить к образованию расплавов, специализированных на рудные элементы. Это подтверждается положением точек составов адакитов Мезкало, Мексика (Gonzalez-Partida, 2003), сопровождающихся промышленной Au-минерализацией. Иными словами, производные адакитовых магм, “несущих” рудную нагрузку, могут быть выделены на основании их геохимических характеристик.

Аналогичные выводы можно сделать и в отношении производных магм HP TTGA. Конфигурация поля составов этих пород на диаграмме Th/Nb – Ва/Nb практически повторяет конфигурацию поля эволюции составов измененной океанической коры, а точки составов пород TTGA Гарганской глыбы, пространственно ассоциирующих с Au-минерализацией этого района, тяготеют к линии равных отношений Ва/Th-оценки среднего состава минерализованной зоны. Иными словами, они могут быть продуктами кристаллизации магм, образовавшихся за счет плавления океанических базальтов минерализованной зоны, обогащенных Au и тяжелыми металлами.

Проверить это предположение можно с помощью данных, приведенных в табл. 1. Мы видим, что все породы TTGA Гарганской глыбы обладают повышенными концентрациями Au, превышаю-

щими в 1.5–10 раз кларк для кислых магматических пород (Войткевич и др., 1990).

Таким образом, несмотря на невозможность полной аналогии современных процессов и процессов, протекавших в архейское время, мы вполне можем выделить производные магм, обладающих потенциальной рудоносностью на золото.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований создан и апробирован алгоритм выделения производных потенциально рудоносных магм TTGA. В основу алгоритма положены геохимические критерии, позволяющие идентифицировать генетическую природу источников вещества и, на этой основе, выделять продукты плавления геохимических резервуаров, обогащенных Au и другими рудными элементами.

Предложенный алгоритм (набор геохимических критериев потенциальной рудоносности) может быть использован при металлогеническом районировании территорий, сложенных породами TTGA в пределах древних кратонов.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование проведено при финансовой поддержке госзадания по Проекту IX.129.1.3. (№ 0350-2016-0029), при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-00399 а) и Правительства Иркутской области, проект № 17-45-388083 р\_а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анисимова И.В., Левицкий И.В., Котов А.Б., Левицкий В.И., Резницкий Л.З., Ефремов С.В., Великославинский С.Д., Бараиш И.Г., Федосеев А.М. Возраст фундамента Гарганской глыбы (Восточный Саян): результаты U-Pb геохронологических исследований // Изотопные системы и время геологических процессов: Мат. IV Рос. конф. по изотопной геохронологии. СПб.: ИГД РАН. 2009. Т. 1. С. 34–35.
- Беличенко В.Г., Резницкий Л.З., Гелетий Н.К., Бараиш И.Г. Тувино-Монгольский массив (к проблеме микроконтинентов Палеоазиатского океана) // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 6. С. 554–565.
- Войткевич Г.В., Кокин А.В., Мирошников А.Е., Прохоров В.Г. Справочник по геохимии. М.: Недра, 1990. 476 с.
- Ефремов С.В., Митичкин М.А. О возможности обнаружения месторождений золота типа Карлин в Восточном Саяне // Вестник ГеоИГУ. Иркутск. 2000. Вып. 2. С. 61–73.
- Ефремов С.В. Редкометалльные гранитоиды Чукотки. Геохимия, источники вещества, модели образования. Дис. ... д-ра геол.-мин. наук. Иркутск.: ИГХ СО РАН, 2012.
- Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Резницкий Л.З., Васильев В.П. и др. О возрасте метаморфизма Слюдянского

- кристаллического комплекса (Южное Прибайкалье): результаты U-Pb геохронологического исследования гранитоидов // Петрология. 1997. Т. 5. № 4. С. 380–393.
- Alt J.C., Emmermann R.* Geochemistry of hydrothermally altered basalts: deep sea Drilling project Hole 504B. Leg 83 / Anderson R.N., Honnorez J., Becker K. et al., Init. Repts., DSDP. 83. – Washington (U.S. Govt. Printing Office). 1983. P. 249–262.
- Alt J.C., Laverne C., Vanko D.A., Tartarotti P., Teagle D.A.H., Bach W., Zuleger E., Erzinger J., Honnorez J., Pezard P.A., Becker K., Salisbury M.H., Wilkens R.H.* 34. Hydrothermal alteration of a section of upper oceanic crust in the eastern equatorial Pacific: a synthesis of results from site 504 (DSDP legs 69, 70 and 83 and ODP legs 111, 137, 140 and 148) // Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific Results. 1996. Vol. 148.
- Autio L.K., Sparks J.W., Rhodes J.M.* Geochemistry of Leg 111 basalts: intrusive feeders for highly depleted pillows and flows // Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific Results. 1989. Vol. 111. P. 3–16.
- Bach W., Irber W.* Rare earth element mobility in the oceanic lower sheeted dyke complex: evidence from geochemical data and leaching // Chemical Geology. 1998. Vol. 151. P. 309–326.
- Beate B., Monzier M., Spikings R., Cotten J., Bourdon J.-S., Eissen J.-P.* Mio-Pliocene adakite generation related to late subduction in southern Ecuador: the Quimsacocha volcanic center // Earth Planet. Sci. Lett. 2001. Vol. 192. P. 561–570.
- Bedard J.H.* A catalytic delamination-driven model for coupled genesis of Archaean crust and sub-continental lithospheric mantle // Geochim. Cosmochim. Acta. 2006. Vol. 70. P. 1188–1214.
- Bourdon E., Eissen J.-P., Monzier M., Robin C., Martin H., Cotten J., Hall M.L.* Adakite-like Lavas from Antisana Volcano (Ecuador): Evidence for Slab Melt Metasomatism Beneath Andean Northern Volcanic Zone // J. Petrol. 2002. Vol. 43. P. 199–217.
- Brenan J.M., Shaw H.F., Ryerson F.J.* Experimental evidence for the origin of lead enrichment in convergent margin magmas // Nature. 1995. V. 378. P. 54–56.
- Bryant J.A., Yagodinski G.M., Hall M.L., Lewicki J.L., Bailey D.G.* Geochemical Constraints on the Origin of Volcanic Rocks from the Andean Northern Volcanic Zone. Ecuador // J. Petrol. 2006. Vol. 47. P. 1147–1175.
- Condie K.C.* TTGs and adakites: are they both slab melts? // Lithos. 2005. V. 80. P. 33–44.
- Defant M.J., Drummond M.S.* Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere // Nature. 1990. Vol. 347. P. 662–665.
- Mc Donough, Sun S.* The composition of the Earth // Chem. Geol. 1995. Vol. 120. P. 223–253.
- Emmermann R.* Basement geochemistry. Hole 504B // Init. Repts., DSDP. 83: Washington (U.S. Govt. Printing Office). 1983. P. 183–199.
- Gonzalez-Partida E.G., Levresse G., Carrillo-Chavez A., Cheilletz A., Gasquet D., Jones D.* Paleocene adakite Au–Fe bearing rocks. Mezcala. Mexico: evidence from geochemical characteristics // J. Geochem. Explor. 2003. Vol. 80. P. 25–40.
- Halla J., Whitehouse M.J., Ahmad T., Anibagai Z.* Archaean granitoids: an overview and significance from a tectonic perspective // Geological Society. London. 2017. Special Publications. 449. <https://doi.org/10.1144/SP449.10>
- Hou Z.-Q., Qu X.-M., Li Y.-G.* Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibetan plateau // Lithos. 2004. Vol. 74. P. 131–148.
- Ickerta R.B., Thorkelson D.J., Marshalla D.D., Ullrich T.D.* Eocene adakitic volcanism in southern British Columbia: Remelting of arc basalt above a slab window // Tectonophysics. 2009. Vol. 464. P. 164–185.
- Jochum K.P., Verma S.P.* Extreme enrichment of Sb, Tl and other trace elements in altered MORB // Chem. Geol. 1996. Vol. 130. № 3–4. P. 289–299.
- Kelley K.A., Plank T., Ludden J., Staudigel H.* Composition of altered oceanic crust at ODP Sites 801 and 1149 // Geochemistry Geophysics Geosystems. 2003. Vol. 4. № 6. P. 1525–2027.
- Kepezhinskas P.K., Sorokina N.A., Mamontova S.A., Savichev A.T.* 9. Rare earth and large-ion lithophile (sr and ba) element geochemistry of diabase dikes. Hole 504B. Costa Rica rift. Leg 140 / Erzinger J., Becker K., Dick H.J.B., Stokking L.B. (Eds.) // Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific Results. 1995. Vol. 137/140. P. 107–116.
- Martin H.* Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids // Lithos. 1999. Vol. 46. P. 411–429.
- Martin H., Smithies R.H., Rapp R., Moyen J.-F., Champiron D.* An overview of adakite, tonalite–trondhjemite–granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution // Lithos. 2005. Vol. 79. P. 1–24.
- Martin H., Moyen J.-F., Guitreau M., Blichert-Toft J., Le Pennec J.L.* Why archaean TTG can not be generated by MORB melting in subduction zones // Lithos. 2014. V. 198–199. P. 1–13.
- Moyen J.-F., Martin H.* Forty years of TTG research // Lithos. 2012. Vol. 148. P. 312–336.
- Nagler Th.F., Kramers J.D.* Nd isotopic evolution of the upper mantle during the Precambrian: models, data and the uncertainty of both // Precambrian Research. 1998. Vol. 91. P. 233–252.
- Petford N., Atherton M.* Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca Batholith, Peru // J. Petrol. 1996. Vol. 37. № 6. P. 1491–1521.
- Plank T., Langmuir C.H.* The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle // Chem. Geol. 1998. Vol. 145. P. 325–394.
- Plank T.* Constraints from Thorium/Lanthanum on Sediment Recycling at Subduction Zones and the Evolution of the Continents // J. Petrol. 2005. Vol. 46. P. 921–944.
- Rapp R.P., Watson E.B., Miller C.F.* Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archaean trondhjemites and tonalites // Precambrian Research. 1991. Vol. 51. P. 1–25.
- Samaniego P., Martin H., Monzier M., Robin C., Fornari M., Eissen J.-P., Cotten J.* Temporal Evolution of Magmatism in the Northern Volcanic Zone of the Andes: The Geology and Petrology of Cayambe Volcanic Complex (Ecuador) // J. Petrol. 2005. Vol. 46. P. 2225–2252.
- Shimizu H., Mori K., Masuda A.* REE, Ba, and Sr abundances and Sr, Nd AND Ce isotopic ratios in Hole 504B basalts, ODP Leg 111, Costa Rica Rift // Proceedings of the

- Ocean Drilling Program. Scientific Results. 1989. Vol. 111. P. 77–83.
- Sparks J.W. 7. Geochemistry of the lower sheeted dike complex. Hole 504b. Leg 140 / Erzinger. J. Becker., K. Dick., H.J.B., and Stokking. L.B. (Eds.) // Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific Results. 1995. Vol. 137/140. P. 81–97.
- Staudigel H., Davies G.R., Stanley R.H., Marchant K.M., Smith B.M. Large scale isotopic Sr, Nd and O isotopic anatomy of altered oceanic crust: DSDP/ODP sites 417/418 // EPSL. 1995. Vol. 130. P. 169–185.
- Thieblemont D., Stein G., Lescuyer J.-L. Gisements epithermaux porphyriques: la connection adakite // C.R. Acad. Sci. (Paris). 1997. Vol. 325. P. 103–109.
- Wang Q., Jian Ping, Zhi-Wei Bao, Ji-Feng Xu, Chao-Feng Li, Xiao-Lin Xiong, Zhen-Huan Zhao, Jin-Long Ma. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting. South China: implications for the genesis of porphyry copper mineralization // Journal of Petrology. 2006. Vol. 47. № 1. P. 119–144.
- Yang Y.-H., Chu Zh. Y., Wu F.-Y., Xia L.-W., Yang J.-H. Precise and accurate determination of Sm, Nd concentrations and Nd isotopic compositions in geological samples by MC-ICP-MS // J. Anal. At. Spectrom. 2010. Vol. 26. P. 1237–1244.
- Zuleger E., Alt J.C., Erzinger J. 6. Primary and secondary variations in major and trace element geochemistry of the lower sheeted dike complex: Hole 504B, Leg 140 / Erzinger. J., Becker K., Dick H.J.B. and Stokking L.B. (Eds.) // Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific Results. 1995. Vol. 137/140. P. 65–80.
- Zuleger E., Alt J.C., Erzinger J. 37. Data report: Trace element geochemistry of the lower sheeted dike complex. Hole 504b (Leg 140) / Alt. J.C. Kinoshita H., Stokking L.B. and Michael P.J. (Eds.) // Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific Results. 1996. Vol. 148. P. 455–466.

## Ore Potential of Granitic Rocks of the Gargan Block, Eastern Sayan

S. V. Efremov<sup>1,\*</sup>, S. I. Dril<sup>1</sup>, N. A. Goryachev<sup>1</sup>, I. V. Levitskiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
PBox 9, 1a, Favorsky street, Irkutsk, 664033

\*E-mail: esv@igc.irk.ru

Based on the analysis of modern genetic models, an algorithm for extracting the derivatives of potentially ore-bearing magmas among Precambrian rocks of the tonalite-trondhjemite-granodiorite associations (TTGA) is developed and tested. The algorithm is implemented as a sequence of geochemical criteria to identify the genetic nature of the sources of substance and on this basis to distinguish the products of melting of geochemical reservoirs enriched in Au and other ore elements. The proposed algorithm (a set of potential geochemical criteria of ore content) can be used for metallogenic zoning of TTGA rocks, within ancient cratons.

**Keywords:** adakites, TTGA, gold, East Sayan, Gargan block.

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0016-777061461-71>