

УДК 550.42

# ОБ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА КИСЛОРОДА И УГЛЕРОДА НА ОСНОВЕ РАСЧЕТА МОДАЛЬНОГО СОСТАВА ПОРОД

О. В. Авченко<sup>1</sup>, А. С. Вах<sup>1,2</sup>, Т. А. Веливецкая<sup>1</sup><sup>1</sup>Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения РАН (ДВГИ ДВО РАН), Владивосток  
*office@fegi.ru*<sup>2</sup>Дальневосточный федеральный университет (ДФУ), Владивосток  
*vakh.as@dvfu.ru*

Изучалось поведение стабильных изотопов кислорода и углерода при метасоматическом изменении гранодиоритов Березитового месторождения (северо-запад Амурской области). Изотопный анализ рассеянного углерода в породах ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ) и кислорода силикатов ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ ) выполнялся в аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН в лаборатории стабильных изотопов на масс-спектрометре Finnigan MAT-253. Установлено закономерное утяжеление величины  $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$  от +9.6‰ до +11.2‰ и уменьшение величины  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  от -10.8‰ до -27.2. ‰ в метасоматических породах в направлении от передовых зон метасоматоза к тыловым. Расчет модального состава образцов из метасоматических зон показал, что изменение изотопных составов связано с направленным развитием кварц-мусковитовой ассоциации по гранитам с увеличением в их составе количества мусковита и кварца, а также с более высоким уровнем восстановленности метасоматитов относительно исходных гранитов.

Ключевые слова: *изотопы кислорода и углерода, граниты, метасоматиты, Березитовое месторождение, Амурская область.*

## INTERPRETATION OF OXYGEN AND CARBON ISOTOPE COMPOSITIONS BASED UPON THE CALCULATION OF MODAL COMPOSITION OF ROCKS

O. V. Avchenko<sup>1</sup>, A. S. Vakh<sup>1,2</sup>, T. A. Velivetskaya<sup>1</sup><sup>1</sup>Far East Geological Institute Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences (FEGI FEB RAS), Vladivostok<sup>2</sup>Far Eastern Federal University (FEFU), Vladivostok

The behavior of oxygen and carbon stable isotopes in granodiorites of the Berezitovoe deposit (the Amur Region northwest) affected by metasomatic processes has been studied. The isotope analysis of trace carbon in rocks ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ) and silicate oxygen ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ ) was carried out at the Analytical Center of Far East Geological Institute FEB RAS, in Laboratory of Stable Isotopes using Finnigan MAT-253 mass-spectrometer. It was determined that quantity of ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ ) and ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ) in metasomatic rocks was regularly varying from their front zones towards the back as follows: ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ ) increased from +9.6‰ to +11.2‰ whereas ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ) decreased from -10.8‰ to -27.2. ‰. Based on the calculation of the modal composition of rock samples from the zones of metasomatic alteration, the change of isotope compositions may be linked to the increasing quartz and muscovite in the granite composition as well as to higher degree of reduction of metasomatic rocks relative to initial granites.

Keywords: *isotopes of oxygen and carbon, granite, metasomatites, Berezitovoe deposit, Amur region.*

### Введение

Интерпретация изотопного состава кислорода и углерода сложна и неоднозначна. На вариации изотопного состава углерода и кислорода в природе влияют разные факторы: величина фугитивности кислорода, величина рН, состав флюида, воздействующего на породу, температура, минералогические особенности и эволюционная история формирования данной породы [7, 11]. Ранее

нами в метасоматитах Березитового месторождения изучался изотопный состав кислорода, свинца и серы. Полученные данные позволили сделать вывод, что метасоматические породы месторождения образовались непосредственно по вмещающим палеозойским гранитам, сера в сульфиде имеет магматический генезис, а состав изотопов рудного свинца свидетельствует о среднепалеозойском возрасте их источника [2].

В данной работе на основе новых данных по стабильным изотопам кислорода и углерода в метасоматитах Березитового месторождения делается попытка объяснить установленные закономерности в изменении изотопного состава направленным изменением модального состава пород в процессе метасоматоза. Модальный состав метасоматитов оценивается на основе разработанной нами оригинальной программы МС [8].



Характеристика минеральных парагенезисов метасоматических пород Березитового месторождения и их модалного состава.

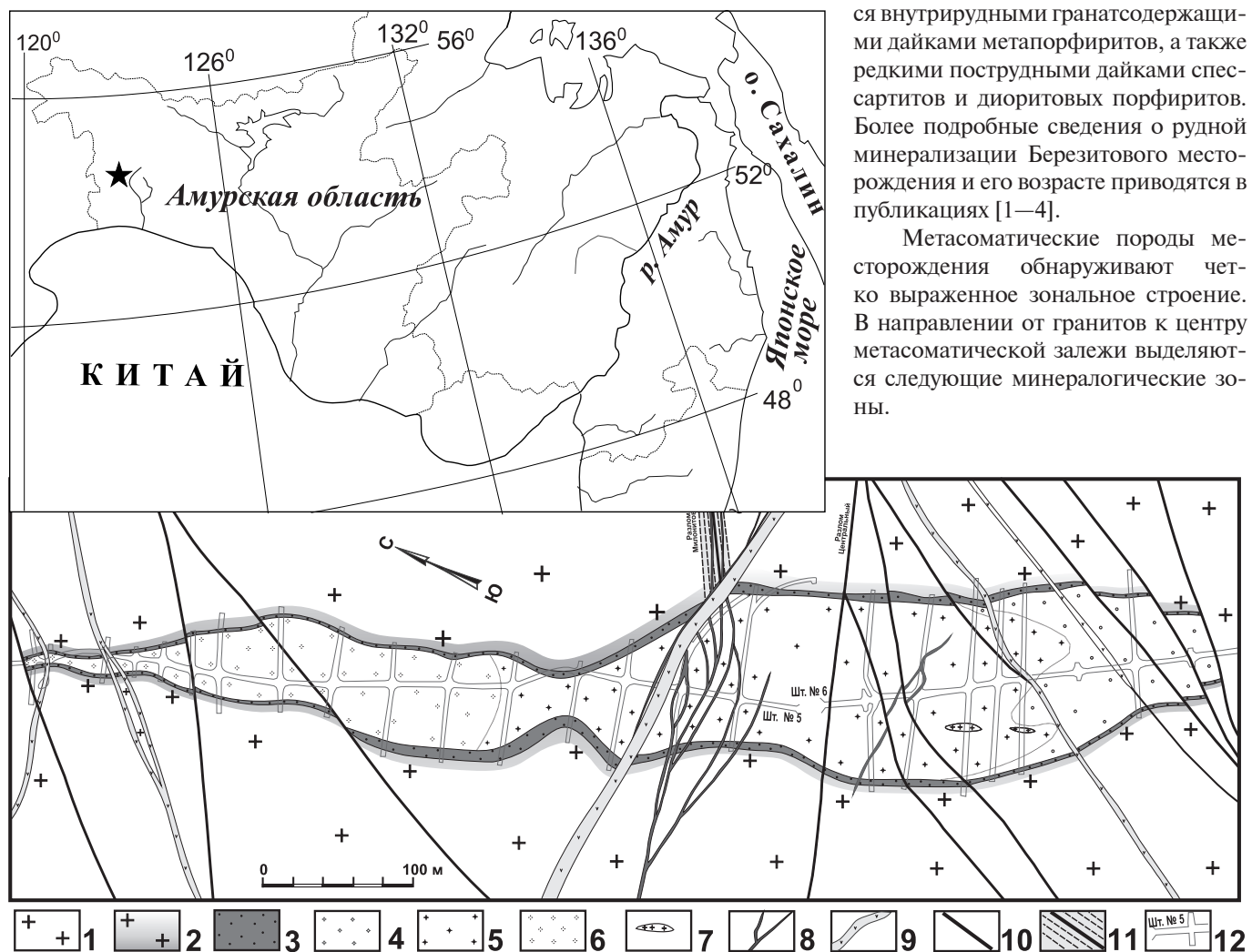
Березитовое золоторудное месторождение расположено в северо-западной части Амурской области в бассейне нижнего течения р. Хайкта, крупного правого притока р. Большой Ольдой (рис. 1). Оно представляет собой сложный тип золоторудения, локализованного во флюидно-эксплозивной структуре, которое по морфологии и составу рудовмещающих пород не имеет близких аналогов среди известных золоторудных месторождений Забайкалья и Дальнего Востока. Месторождение представлено сульфидсодержащими

метасоматическими породами, которые локализованы в массиве порфировидных гранодиоритов палеозойского возраста [3] в виде двух совмещенных перевёрнутых конусов, расположенных последовательно друг за другом, причем южный конус в 1.5–2 раза больше северного. Эти своеобразные конусообразные крутопадающие структуры представляют собой флюидно-эксплозивные образования [6]. Рудное тело месторождения имеет сложную линзовидную форму (рис. 1). Длина его на поверхности достигает 950 метров. Мощность зоны меняется от 10–15 до 110 м.

Рудовмещающие породы месторождения сложены светло-серыми, зеленовато-серыми массивными

ми, реже сланцеватыми метасоматитами кварц-мусковитового состава, с вкрапленностью альмандин-спессартинового граната и турмалина. Реже в составе метасоматитов в переменных количествах встречается ортоклаз, хлорит, биотит, анортит, цинковая шпинель (железистый гранит), титанит, циркон, эпидот, алланит, пренит, фторопацит, флюорит, графит, гротит, червандонит-(Ce). Метасоматиты сильно брекчированы, причем обломочный материал метасоматических брекчий цементируется сульфидными минералами по системе сложных трещин, что свидетельствует о наложении рудной минерализации на метасоматические породы. Зона метасоматитов пересекается внутрирудными гранатсодержащими дайками метапорфиров, а также редкими пострудными дайками спессартитов и диоритовых порфиров. Более подробные сведения о рудной минерализации Березитового месторождения и его возрасте приводятся в публикациях [1–4].

Метасоматические породы месторождения обнаруживают четко выраженное зональное строение. В направлении от гранитов к центру метасоматической залежи выделяются следующие минералогические зоны.



**Рис. 1.** Геологический план Березитового месторождения. Схема строения рудной зоны месторождения на горизонте 676 м: 1 — порфировидные биотит-роговообманковые гранодиориты палеозойского возраста; 2 — метасоматически измененные биотит-роговообманковые гранодиориты; 3–6 — основные типы рудовмещающих метасоматических пород: 3 — гранат-ортоклаз-биотит-анортит-мусковит-кварцевые с пиритовой минерализацией, 4 — турмалин-гранат-ортоклаз-мусковит-кварцевые с преимущественно пиритовой минерализацией, 5 — турмалин-гранат-мусковит-кварцевые с золото-пирит-галенит-сфалеритовой минерализацией; 6 — турмалин-гранат-кварц-мусковитовые с золото-пирит-пирротин-сфалеритовой минерализацией; 7 — ксенолиты частично измененных гранодиоритов; 8 — дайки метапорфиров гранат-мусковит-биотит-кварц-анортитового состава; 9 — пострудные дайки спессартитов и диоритовых порфиров; 10 — основные тектонические нарушения; 11 — зона катаклазированных и измененных гранодиоритов с прожилковой полиметаллической минерализацией, 12 — подземные горные выработки. На врезке звездочкой показано географическое положение Березитового месторождения.

1. *Зона А. Слабоизмененный гранодиорит.* Магматический парагенезис:  $Q + Pl_{25-35} + Kfs + Bi + Hb$ . Изменение гранодиоритов выражено в развитии вторичного биотита по роговой обманке, появлении в небольших количествах новообразованного мусковита, кварца, хлорита и эпидота. Структура пород гранитная, порфиоровидная, среднезернистая. Акцессорные минералы представлены преимущественно апатитом, цирконом, магнетитом, ортитом и сфеном.

2. *Зона В. Сильноизмененный гранодиорит.* Ведущий магматический парагенезис остается таким же, как в зоне А:  $Q + Pl_{25-35} + Kfs + Bi + Hb^*$ . Однако изменение пород здесь выражено сильнее и обусловлено появлением мелких и мельчайших табличек основного плагиоклаза (вплоть до анортита), обильного мусковита и кварца, эпидота, хлорита и сульфидов, преимущественно пирита. В составе этих гранодиоритов участками присутствуют турмалин и андрадит-гроссуляровый гранат. При этом в породах сохранена первичная гранитная гипидиоморфнозернистая структура. Мощность зоны сильноизмененных гранодиоритов составляет первые метры.

3. *Зона С. Темно-серые тонкозернистые метасоматиты* представлены плотными темно-серыми породами, в которых широко развиты идиоморфные кристаллы розового граната. Парагенезис пород:  $Q + Ms + Gr + Kfs + Bi + Pl_{90-95}$ . Свообразие этого типа пород подчеркивается значительными количествами новообразованного плагиоклаза, по составу близкого к анортиту. В составе метасоматитов в небольших количествах отмечаются турмалин, пирит, пирротин, магнетит, ильменит, сфалерит и галенит. Метасоматиты слагают зону мощностью от первых десятков сантиметров до 10 м, окаймляя трубообразную метасоматическую залежь на ее контакте с гранитами (рис. 1).

4. *Зона D. Светло-серые рудосные метасоматиты* основной части метасоматической залежи представлены тонкозернистыми светло-серыми породами, в которых видны мелкие единичные розовато-бурые агрегаты граната. В отдельных участках

пород совместно с гранатом находят агрегаты цинковой шпинели — ганина. Парагенезис пород:  $Q + Ms + Gr + Kfs + Bi$ . В этих породах анортит отсутствует, а биотит присутствует в весьма малых количествах. Повсеместно в составе метасоматитов в переменных количествах наблюдаются также мелкие единичные агрегаты темно-коричневого турмалина.

Нашими исследованиями установлено, что при образовании метасоматических пород из гранодиоритов выносятся натрий, кальций, барий и стронций, а калий, марганец и рубидий привносятся [1]. Изменение состава гранодиоритов в процессе ме-

тасоматоза хорошо видно на диаграмме де ля Роша [9]. Метасоматиты тыловой зоны (зона D) занимают на этой диаграмме наиболее крайнее правое и нижнее положение, тогда как породы промежуточной зоны (зона С) тяготеют к полю измененных гранодиоритов. Вместе с тем точки составов даек гранатосодержащих метапорфиритов, не затронутых метасоматозом, компактно расположены в поле диоритов (рис. 2). Модальный состав образцов всех минералогических зон, рассчитанный по программе МС<sup>1</sup>, показан в таблице 1. Видно, что в последовательности образцов из зон А–D (т. е. от гранодиоритов внутрь метасоматического тела) постепенно

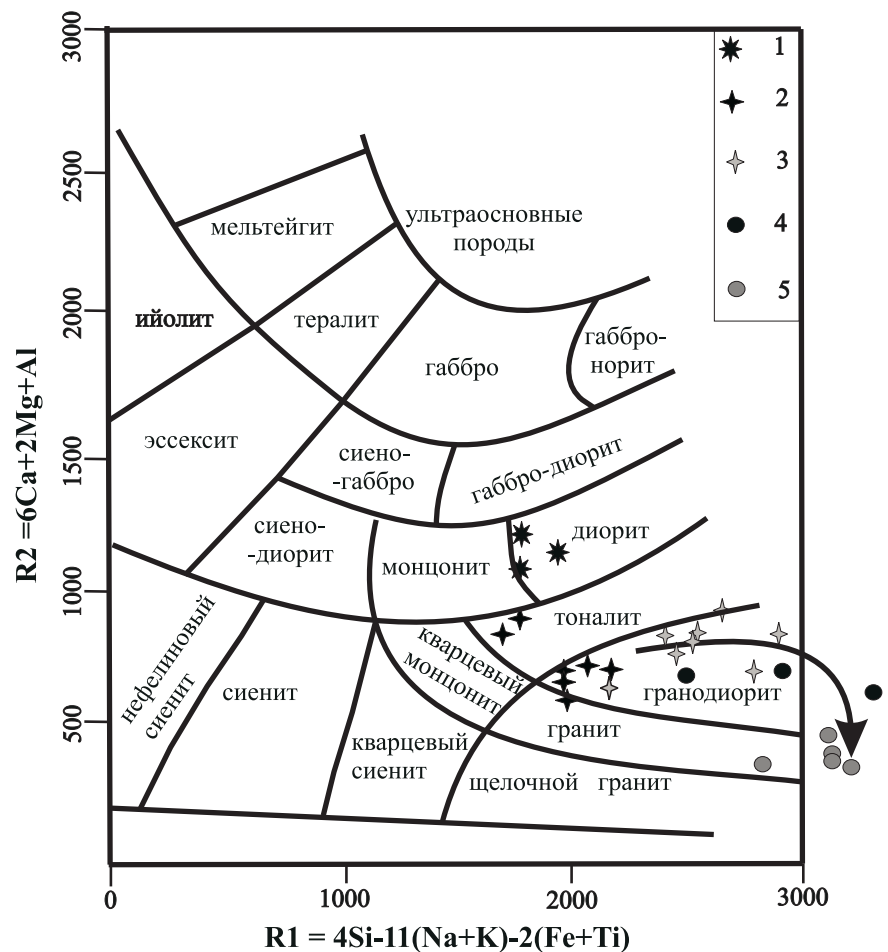


Рис. 2. Положение гранодиоритов, метасоматитов и метапорфиритов Березитового месторождения на диаграмме де ля Роша [9]. Типы пород: 1 — метапорфириты; 2 — порфиоровидные гранодиориты; 3 — метасоматически измененные гранодиориты; 4 — темно-серые гранат-ортоклаз-биотит-анортит-мусковит-кварцевые метасоматиты; 5 — светло-серые турмалин-гранат-мусковит-кварцевые метасоматиты. Стрелка показывает примерное изменение состава гранодиоритов в направлении от малоизмененных гранитоидов (зона А, В) к темно-серым (зона С) и светло-серым (зона D) метасоматитам. Обращает на себя внимание то, что темно-серые метасоматиты находятся на диаграмме в промежутке между малоизмененными гранодиоритами и светло-серыми метасоматитами. Исходные данные приведены в работе [1].

<sup>1</sup> Программа МС рассчитывает модальный состав пород на основе результатов их валового химического состава и составов слагающих породу минералов. Эта программа, описание алгоритма и примеры расчетов, в том числе и данные табл. 1, помещены в открытом доступе на информационном сервере ДВГИ ДВО РАН по адресу: <http://www.fegi.ru/innov/461-тс>. Описание программы приводится также в публикации [8].



Таблица 1

**Модальный состав (вес. %) гранодиоритов и метасоматитов  
Березитового месторождения**

Обр.	Зона	Qtz	Kfs	Plag	Wm	Gr	Bi	Rut	Ep	Apat	Mgt	Ilm	Gbs	Σ	Res
1-Б	<b>A</b>	19	7	49.9	1.7	—	10.6	0.2	9.6	0.5	1.3	—	—	99.8	0.00
5	<b>B</b>	25.4	9.5	42.9	10.6	—	8	0.1	1.3	0.3	1.8	0	—	99.9	0.00
8-1	<b>C</b>	40.3	6.0	12.9	26.6	4.5	8.6	—	—	0.3	0.4	0.2	—	99.8	0.03
8-2	<b>D</b>	47.5	—	1.2	49.7	0.4	—	0.1	—	0.0	0.03	—	1	99.9	0.03

**Примечание.** Индексы минералов: Qtz — кварц, Kfs — калиевый полевой шпат, Plag — плагиоклаз, Wm — мусковит, Gr — гранат, Bi — биотит, Rut — рутил, Ep — эпидот, Apat — апатит, Mgt — магнетит, Ilm — ильменит, Gbs — гиббсит. Res — остаток химического состава породы, не укладываемый в рассчитанный модальный состав.

увеличивается содержание кварца и мусковита, а количество плагиоклаза убывает. Кроме того, в этой же последовательности зон А–D резко уменьшаются, практически до нуля, количества эпидота и магнетита. Этими двумя хорошо заметными закономерностями мы попытаемся объяснить особенности изменения изотопных составов кислорода и углерода в породах рассматриваемого месторождения.

**Методика анализа стабильных изотопов углерода и кислорода**

Изотопный анализ рассеянного углерода в породах и кислорода силикатов выполнялся в аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН в лаборатории стабильных изотопов. Подготовка образцов к масс-спектрометрическому изотопному анализу углерода проведена по методике окисления углерода на окислительной колонке CuO [5]. Измерение изотопного отношения  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  проводилось на изотопном масс-спектрометре Finnigan MAT-253 с использованием двойной системы напуска. Результаты измерений  $\delta^{13}\text{C}$  даны в отношении к международному стандарту PDB. Воспроизводимость метода составляла  $\pm 0.1\%$ . Подготовка образцов к масс-спектрометрическому изотопному анализу кислорода проведена по лазерной методике. Выделение кислорода произведено методом фторирования с использованием пентафторида брома ( $\text{BrF}_5$ ). Выделенный кислород очищали от продуктов реакции и остатков реактива на криогенных ловушках и ловушке с KBr. Измерение изотопных отношений  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  проведено на изотопном масс-спектрометре Finnigan MAT-253 относительно лабораторного стандарта, калиброванного по

международным стандартам NBS-28, NBS-30. Воспроизводимость значений  $\delta^{18}\text{O}$  ( $1\sigma$ ) составляла  $\pm 0.2\%$ ,  $n = 10$ . Масса анализируемых образцов 1–2 мг. Результаты измерений  $\delta^{18}\text{O}$  даны в отношении к международному стандарту VSMOW. Воспроизводимость метода составляла  $\pm 0.2\%$ .

**Результаты и обсуждение**

Стабильные изотопы кислорода изучали в метасоматических породах и гранитах месторождения (всего 10 образцов). Анализ производился как в целом по породе, так и в мономинеральных пробах кварцев. Образцы гранитов отобраны на расстоянии 10, 5, 1 м от контакта с метасоматитами и непосредственно вблизи контакта с метасоматической зоной. Образцы метасоматических пород были представлены темно-серыми и светло-серыми метасоматитами. Как видно из таблицы 2, значение  $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$  постепенно увеличивается в направлении от слабоизмененных гранодиоритов внутрь метасоматического тела — от  $+9.6\%$  до  $+11.2\%$ . При этом величина  $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$  в чисто отобранном кварце из гранитов заметно меньше, чем  $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$  в кварце из светло-серых метасоматитов (табл. 2). Известно, что последовательность минералов по возрасту в них  $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$  выглядит следующим образом: биотит — мусковит — плагиоклаз — калиевый полевой шпат — кварц [7]. Поэтому развитие мусковита за счет плагиоклаза должно приводить при прочих равных условиях к повышению величины  $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$  образующегося кварца. Следовательно, мы получаем простое объяснение факту утяжеления изотопного состава кислорода (табл. 2), поскольку содержание кварца и мусковита, как

выше упоминалось, с увеличением степени метасоматоза возрастают (табл. 1). В то же время наименее измененные метасоматозом гранодиориты (обр. 1-Б, табл. 2) по изотопному составу кислорода отвечают «нормальной» группе гранитоидов [10].

Как видно из таблицы 2, наблюдается четкое уменьшение величины  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  в направлении от слабоизмененных гранодиоритов к светло-серым метасоматитам или внутрь метасоматического тела: от  $-10.8\%$  до  $-27.2\%$ . Поскольку карбонаты в рассматриваемых метасоматитах полностью отсутствуют, рассеянный углерод в наших породах может находиться в жидких или газовых включениях преимущественно как  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и в виде графита. Хорошо известно [2], что метан в равновесии с  $\text{CO}_2$  или с графитом относительно обогащен легким изотопом углерода, поэтому повышение восстановленности системы  $\text{CO}_2\text{—CH}_4$  или  $\text{C—CO}_2\text{—CH}_4$  (другими словами, увеличение мольной доли метана в анализируемом газе) должно приводить к уменьшению величины  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ . Гранодиориты по отношению к метасоматитам, несомненно, более окислены, поскольку содержат, в отличие от метасоматитов, минералы с трехвалентным железом — эпидот и магнетит (табл. 1). Отсюда видно, что более высоким уровнем восстановленности метасоматитов, сравнительно с гранодиоритами, можно объяснить установленный сдвиг изотопного состава рассеянного углерода в «легкую» сторону, в направлении от гранодиоритов к метасоматитам.

Таким образом, установлено закономерное утяжеление величины  $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$  от  $+9.6\%$  до  $+11.2\%$  и уменьшение величины  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  от  $-10.8\%$  до  $-27.2\%$  в метасоматических породах в направлении



Таблица 2

**Изотопный состав кислорода ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ ) и рассеянного углерода ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ )  
в гранитах и метасоматических породах месторождения Березитовое**

Аналитики Е. С. Ермоленко, Т. А. Веливецкая

№ обр.	Характеристика породы	Зона метасоматоза	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$
1-Б	Слабоизмененный гранит – 10 м от контакта с метасоматитами	<b>A</b>	8.9	-10.8
2-Б	Слабоизмененный гранит – 5 м от контакта с метасоматитами		10.1	-13.1
3-Б	Слабоизмененный гранит – 1 м от контакта с метасоматитами		9.7	-11.6
1	Кварц из неизмененных гранитов		<b>9.6</b>	-
5	Гранит вблизи контакта с метасоматитами	<b>B</b>	10.0	-25.8
5-В	Гранит вблизи контакта с метасоматитами		9.8	-27.2
4-А	Метасоматит темно-серый	<b>C</b>	10.5	-19.5
4-В	Метасоматит темно-серый		10.4	-17.2
8-1	Метасоматит темно-серый		10.0	-21.4
6	Метасоматит светло-серый	<b>D</b>	10.8	-27.1
8-2	Метасоматит светло-серый		10.6	-27.2
2	Кварц из светло-серых метасоматитов		<b>11.2</b>	-

от передовых зон метасоматоза к тыловым. Расчет модального состава образцов из метасоматических зон показал, что это изменение изотопных составов кислорода и углерода связано с направленным развитием

кварц-мусковитовой ассоциации по гранитам с увеличением количества мусковита и кварца и более высоким уровнем восстановленности метасоматитов сравнительно с гранитами.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 15-05-00809.*

### Литература

1. Авченко О. В., Вах А. С., Чудненко К. В., Худоложкин В. О. Генезис гранат-содержащих пород Березитового месторождения (Верхнее Приамурье, Россия) // Геология рудных месторождений. 2014. Т. 56. № 1. С. 19–40.  
2. Авченко О. В., Вах А. С., Горячев Н. А., Александров И. А., Веливецкая Т. А., Капитонов И. Н. Генезис Березитового золото-полиметаллического месторождения (на основе данных по изотопному составу свинца, кислорода и серы) // Доклады РАН. 2013. Т. 453. № 2. С. 185–189.  
3. Вах А. С., Авченко О. В., Киселев В. И., Сергеев С. А., Пресняков С. Л. Геохронологические U-Pb-изотопные исследования цирконов из гранитов и рудоносных метасоматитов Березитового золото-полиметаллического месторождения (Верхнее Приамурье, Россия) // Тихоокеанская геология. 2013. Т. 32. № 6. С. 20–39.  
4. Вах А. С., Степанов В. А., Авченко О. В. Березитовое золото-по-

лиметаллическое месторождение: геологическое строение и состав руд // Руды и металлы. 2008. № 6. С. 44–48.  
5. Веливецкая Т. А., Игнатьев А. В., Рейзе М. В., Кияшко С. И. Экспрессный метод подготовки жидких и твердых проб органических веществ для изотопного анализа углерода // Масс-спектрометрия. 2006. Т. 3. № 3. С. 169–174.  
6. Туговик Г. И. Флюидно-эксплозивные структуры и их рудоносность. М.: Наука, 1983. 192 с.  
7. Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 590 с.  
8. Чудненко К. В., Авченко О. В., Вах А. С., Чудненко А. К. Петрологический инструмент для вычисления реального минерального состава горной породы (программа MC) // Геоинформатика. 2014. № 2. С. 44–54.  
9. De La Roche H., Leterrier P., Grand/Clode P., Marchal M. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1R2 — diagram and major element analyses — its relationships with current nomenclature // Chem. Geol. 1980. V. 29. P. 183–210.

10. Taylor H. P. Oxygen and hydrogen isotope of plutonic granite rocks // Earth and Planet, Sci. Lett. 1978. V. 38. P. 177–210.

11. Hoefs J. Stable Isotope Geochemistry. Springer-Verlag. Berlin. Heidelberg. 2009. 281 p.

### References

1. Avchenko O. V., Vakh A. S., Chudnenko K. V., Khudolozhkin V. O., *Genesis granat-soderzhaschih porod Berезitovogo mestorozhdeniya (Verhnee Priamur'e, Rossiya)* (Genesis of garnet-containing rocks from Berезitovoe deposit (Upper Amur, Russia)) // *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*, 2014, V. 56, No 1. pp. 19-40.  
2. Avchenko O. V., Vakh A. S., Goryachev N. A., Aleksandrov I. A., Velivetskaya T. A., Kapitonov I. N., *Genesis Berезitovogo zolotopolimetallicheskogo mestorozhdeniya (na osnove dannyh po izotopnomu sostavu svintsya, kisloroda i sery)* (Genesis of Berезitovoe gold-polymetallic deposit (on the basis of Pb, O, S isotope



composition)// Doklady RAN, 2013, V. 453, No 2, pp. 185-189.

3. Vakh A. S., Avchenko O. V., Kiselev V. I., Sergeev S. A., Presnyakov S. L., *Geohronologicheskie U-Pb izotopnye issledovaniya tsirkonov iz granitov i rudonosnyh metasomatitov Berezitovogo zoloto-polimetallicheskogo mestorozhdeniya (Verhnee Priamur'e, Rossiya)* (Geochronological U-Pb isotope study of zircons from garnets and ore-bearing metasomatites of Berezitovoe gold-polymetallic deposit (Upper Amur, Russia))// *Tihookeanskaya geologiya*, 2013, V. 32, No 6, pp. 20-39.

4. Vakh A. S., Stepanov V. A., Avchenko O. V., *Berezitovoe zoloto-polimetallicheskoe mestorozhdenie: geologicheskoe stroenie i sostav rud* (Berezitovoe gold-polymetallic deposit: structure and composition)// *Rudy i metally*, 2008, No 6, pp. 44-48.

5. Velivetskaya T. A., Ignat'ev A. V.,

Reize M. V., Kiyashko S. I., *Ekspressnyi metod podgotovki zhidkih i tverdyh prob organicheskikh veschestv dlya izotopnogo analiza ugleroda* (Express method of preparation of liquid and solid samples of organic substances for isotope analysis of carbon)// *Mass-spektrometriya*, 2006, V. 3, No 3, pp. 169-174.

6. Tugovik G. I., *Flyuidno - eksplozivnye struktury i ih rudonosnost'* (Fluid explosive structures and their ore composition), Moscow: Nauka, 1983, 192 pp.

7. For G., *Osnovy izotopnoi geologii* (Basics of isotope geology), Moscow: Mir, 1989, 590 pp.

8. Chudnenko K. V., Avchenko O. V., Vakh A. S., Chudnenko A. K. *Petrologicheskii instrument dlya vychisleniya real'nogo mineral'nogo sostava gornoj porody (programma MS)* (Petrological instrument to assess real mineral composition of

rocks)// *Geoinformatika*, 2014, No 2, pp. 44-54.

9. De La Roche H., Leterrier P., Grand/Clode P., Marchal M. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1R2 — diagram and major element analyses — its relationships with current nomenclature // *Chem. Geol.* 1980, V. 29, pp. 183—210.

10. Taylor H. P. Oxygen and hydrogen isotope of plutonic granite rocks // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 1978, V. 38, pp. 177—210.

11. Hoefs J. *Stable Isotope Geochemistry*. Springer-Verlag. Berlin. Heidelberg, 2009, 281 pp.

**Рецензент**

**Д. Г.-М. Н. В. И. Силаев**