Дискуссии

УДК 550.8:517.9:550.4: 552.11:552.3 (571.61)

DOI: 10.31431/1816-5524-2020-4-48-85-100

ТЕМПЕРАТУРА, ВОДОРОДНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ И АНОМАЛИИ ОТНОШЕНИЙ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАСОМАТИТОВ ПРИАМУРЬЯ

© 2020 Т.В. Володькова

Институт Тектоники и Геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск, Россия, 680000; e-mail: volodkova@itig.as.khb.ru

По аэрогеофизическим данным установлены значения надфоновых аномалий отношений естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ) различных типов метасоматитов Приамурья. Три характеристики аномалий отношений ЕРЭ, а также значения температуры и водородного показателя связаны дифференциальным уравнением. Найдено его решение в частных производных. Эта зависимость математически описывает процессы регионального метасоматоза и выражена графически эллипсами либо вырожденными гиперболами. Установленные закономерности подтверждены экспериментальными данными. Показано: набор характеристик отношений ЕРЭ, температуры и водородного показателя однозначно, в пределах допустимых погрешностей, определяет любой тип метасоматитов Приамурья. В процессе аэрогеофизических работ полученную зависимость можно использовать для картирования региональных метасоматических систем в рудных узлах и полях месторождений. Применение такой методики на начальных стадиях прогноза полезных ископаемых позволяет резко увеличить достоверность результатов и локализовать перспективные площади.

Ключевые слова: аэрогаммаспектрометрия, метасоматиты Приамурья, дифференциальное уравнение, эллипс, вырожденная гипербола.

Статья публикуется в разделе «Дискуссии» по предложению рецензентов.

ВВЕДЕНИЕ

По опыту золоторудных компаний, при работах по категории С2, погрешность определения рудных запасов составляет около 40%, она в несколько раз выше при прогнозных поисковых работах; из объектов, выделенных по категории Р, как перспективные, менее 10% в дальнейшем подтверждают какие-то перспективы, что ведет к многомиллионным потерям (Боярко, 2010; Соболев, 2011). Много точнее ресурсы оцениваются при наличии моделей региональной метасоматической зональности рудных узлов и полей, тесно связанных с рудными процессами, для чего нужны крупномасштабные наземные исследования с большим объемом дорогих минералого-петрографических и лабораторных работ; образцом может служить работа И.Н. Шестерневой (1986). В Приамурье построено не более первых десятков подобных моделей, в том числе,

по всем месторождениям (рис. 1), они окончательно составляются на стадиях оценочных и разведочных работ, часто много позже основных исследований, пример — результаты по месторождению Белая Гора¹. Использование опережающих аэрогеофизических данных для построения моделей зональности на стадии P₁ – P₃, может принципиально упростить и удешевить задачу оценки рудных ресурсов (Коробейников, 2019).

При метасоматозе (замещении химических элементов и минералов), скорость выноса и перераспределения зависит от положения элементов в ряду подвижности. Наиболее активны вода, углекислый газ, калий; уран, торий обладают относительно высокой и средней подвижностью.

¹ Бирюков Е.И., Гредина З.О. Отчет по результатам геолого-разведочных работ на рудное золото на флангах месторождения Белая Гора (масштаб 1:10000) в 2016–2018 гг. Ф. ДТФГИ. 2019. 198 с.





Рис. 1. Обзорная карта. Месторождения: 1 — Белая Гора; 2 — Лунное-Карадуб; 3 — Хинганское; 4 — Кондер; 5 — Агние-Афанасьевское; 6 — Ночной; 7 — Кировское.

Fig. 1. An overview map: Ore deposits of 1 – Belaya Gora, 2 – Lunnoye-Karadub, 3 – Hinggan, 4 – Konder. 5 – Agniye-Afanasyevskoye, 6 – Nochnoy, 7 – Kirovskoye.

Д.С. Коржинский, В.А. Жариков и их последователи (Коржинский, 1967, 1969, 1973, 1993; Метасоматизм..., 1998) определили законы, которыми описываются идеальные модели локальных диффузионных и региональных инфильтрационных процессов метасоматической зональности. В моделях метасоматической зональности они традиционно использовали породообразующие инертные (мало подвижные) окислы в составе минеральных ассоциаций, по которым на практике метасоматическая зональность и ее границы могут быть легко прослежены невооруженным глазом. Универсального численного решения дифференциальных уравнений для любых типов метасоматоза до сих пор не существует; Д.С. Коржинским (1973, 1993) выведены общие формулы для частных идеальных случаев. В локальных диффузионных системах концентрация вещества и минералогический состав в небольших зонах меняются непрерывно, частицы активно двигаются в направлении уменьшения химического потенциала компонентов в растворах. В региональных инфильтрационных процессах метасоматоза по Д.С. Коржинскому (1993) частицы двигаются под воздействием просачивающихся водных растворов (расплавов); минералогический состав любой зоны постоянен, он скачком меняется на ее границах, формируя метасоматическую колонку. Идеальные модели метасоматоза не противоречат реальным геологическим фактам

и подкреплены экспериментами (Зарайский, 2007). Тем не менее, количественное и экспериментальное моделирование метасоматических систем различных типов (метасоматических колонок) — трудоемкая сложная задача, ведь минералообразующие элементы в природных системах распределены крайне неоднородно, их содержания могут быть определены только с помощью дорогих лабораторных химических и минералогических анализов.

Этих недостатков, по нашему мнению, лишены модели с использованием характеристик естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ); на объектах, не связанных с радиоактивными рудами, ЕРЭ обычно подвижны и гораздо равномернее пропитывают среду в виде микропримеси. За счет сглаживающего эффекта аэрогеофизических работ, на макроуровне равномерность распределения примеси ЕРЭ в породах выражена особенно отчетливо (Володькова, 1999; Глубинное..., 2010). Содержания ЕРЭ определяются в процессе крупномасштабной аэрогеофизической съемки. Уран, торий, калий перераспределяются с постоянной, но разной скоростью, поэтому для характеристики метасоматитов лучше всего использовать величины отношений ЕРЭ (Володькова, 1999, 2016, 2019; Глубинное..., 2010; Жерин, Амелина, 2009) Автором данной работы получено теоретическое решение дифференциального уравнения регионального метасоматоза. В нем используются значения U/Th, K/Th, U/K, а также величины температур T и водородного показателя pH. Получены также их экспериментальные распределения.

Главной задачей представленной работы является доказательство графоаналитическим методом полного соответствия в пределах доверительного интервала теоретического и экспериментального решений уравнения инфильтрационного метасоматоза.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

На территории Приамурья преобладают аэрогаммаспектометрические съемки с использованием аппаратуры СКАТ-77, СТК-11, для которых среднеквадратическая погрешность измерения концентраций ЕРЭ составляет: по урану — (0.1-0.15)×10-4%, торию — (0.55-0.65)×10-4%, калию — (0.05-0.10)%. Согласно принципу постоянства отношений (Володькова, 1999, 2016), неизмененные вулканогенно-осадочные породы любой структурно-формационной зоны (СФЗ), сформированные в течение одного тектоно-магматического цикла, вне зависимости от состава, характеризуются близкими (почти постоянными) величинами средних отношений ЕРЭ U/Th, K/Th, U/K. Гидротермально-метасоматически измененные породы (со степенью изменения более 10-20%) уверенно выделяются аномальными отношениями ЕРЭ. Основное достоинство использования отношений концентраций ЕРЭ заключается в соизмеримости результатов наземных массовых геохимических и воздушных съемок, что доказано автором статистически. Величины отношений ЕРЭ даны в условных единицах; при этом опускается степенной коэффициент величин, который составляет: для *U*/*Th* — 1, для *K*/*Th* — 10⁻⁴, для *U*/*K* — 10⁺⁴.

М.И. Альтшулером и Г.И Кузьминым (1993) впервые установлено, что региональные ареалы рудных полей и узлов диаметром до 15 км в полях отношений ЕРЭ характеризуются концентрически-кольцевой зональностью. А именно, различные аномалии, например, калий-ториевые, уран-калиевые, четко распределяются по зонам и соответствуют разным типам гидротермальнометасоматических изменений. Концентрическикольцевая зональность региональных метасоматитов рудных полей и узлов — классическое явление в геологии (Коржинский, 1969; Коробейников, 1982; Метасоматизм..., 1975; Плющев и др., 2012). По данным М.И. Альтшулера и Г.И. Кузьмина (1993), зональность аномалий отношений ЕРЭ типична для метасоматитов, связанных с интрузиями небольшого диаметра (до 10 км), малыми субвулканическими и вулканическими куполами и телами в вулканоплутонических поясах.

Тогда же подобные результаты были получены автором этой работы на Кировском месторождении (рис. 1) в Амурской области². В полях отношений ЕРЭ могут также выделяться типы метасоматоза (часто грейзены) не обладающие зональностью.

Таким образом, экспериментально установлено, что каждый тип (фация) метасоматоза определяется собственным набором характеристик отношений ЕРЭ. Затем для разработки принципов картирования гидротермальнометасоматических изменений по аэрогеофизическим данным, которые значительно упростили бы решение и достоверность поисковых задач, автором длительно собиралась статистика (Володькова, 1999, 2016; Глубинное..., 2010).

За рубежом известны технологии картирования ореолов метасоматоза и поисков месторождений с использованием аппаратуры ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer). Метод ASTER основан на том, что региональные ареалы метасоматитов и сопутствующие им породы, как правило, контрастно отличаются по цвету и структуре (отражательным способностям на цветных фотоснимках), поэтому хорошо регистрируются в процессе воздушной и космической многозональной съемки (Perrotta et al., 2008; Yamaguchi et al., 1998). Выявление таких ареалов — важнейший признак при поисках месторождений в слабоизученных регионах. Иностранные специалисты картируют не типы (фации) метасоматоза, а только ведущие минералы, влияющие на цвет и структуру. Метод ASTER часто используется в комплексе с АГСМ съемкой: последняя обычно используется для геокартировочных целей (Hyvönen et al., 2005; Perrotta et al., 2008).

С использованием собственных оригинальных данных и фондовых материалов изучена выраженность ореолов метасоматитов на картах отношений ЕРЭ масштаба 1:10000—1:50000; подтверждено наличие устойчивых связей между геолого-геохимическими и геофизическими данными (Геодинамика..., 2006; Глубинное..., 2010). Совместный анализ геолого-геофизических признаков метасоматоза, показал:

– каждая фация метасоматоза, в понимании В.А. Жарикова, (Метасоматизм..., 1998) любого объекта Приамурья однозначно картируется набором значений аномалий *U*/*Th*, *K*/*Th*, *U*/*K* (6 независимых градаций «выше-ниже фона»);

² Давыдов А.С., Володькова Т.В., Мильденденсер В.А. и др. Отчет о поисковых работах масштаба 1:10000 на флангах Кировского золоторудного месторождения (Кировский участок). Ф. АФ ДТФГИ-ГЭ. 1988. Т. 2. Геофизика. 162 с.

– точность расчетов определяется величиной доверительного интервала Δ , тождественного двойной-тройной среднеквадратической погрешности ($\Delta U/Th - 0.1$, $\Delta K/Th - 0.1$, $\Delta U/K - 0.25$), в условных единицах;

– недостаток данных не позволяет количественно оценить зависимость величин аномалий отношений ЕРЭ от степени метасоматоза;

 – априори метасоматиты (условно, степень вторичных изменений более 50%) характеризуются экстремальными значениями аномалий отношений ЕРЭ с разбросом до (2–3)∆;

– гидротермально-метасоматические породы с более слабой степенью изменений (20–50)% имеют близкие для метасоматитов тенденции изменений отношений ЕРЭ, с широкими вариациями характеристик до (6–8)∆;

– в рудных узлах, рудных полях картируются преимущественно региональные ореолы метасоматоза, образующие концентрически-кольцевые (эллиптические) системы из нескольких соизмеримых по ширине зон различной фациальной принадлежности, общим диаметром до 10–20 км и более; границы между фациями резко выражены.

Положения основаны на высоком соответствии набора крупномасштабных схем метасоматической зональности, построенных по картам аномалий отношений ЕРЭ и геологогеохимическим данным (рис. 2).

Картирование метасоматитов Приамурья осложнено погрешностями аэрогаммаспектрометрии, недостатком фактических данных о типе метасоматоза и степени метасоматической проработки: априори принято, что экстремальные значения определяют метасоматоз со степенью изменений 100%. В фондовых материалах, использованных при классификации метасоматитов, иногда приводились только описания ведущих минеральных ассоциаций, тогда фация метасоматоза определялась приближенно (данные по объектам Лунный-Карадуб, Агние-Афанасьевский)^{3,4,5,6}, т.е. данные по метасоматитам довольно неоднородны по точности. Характеристики отношений ЕРЭ различных типов метасоматитов (табл. 1) приведены ранее в (Глубинные..., 2010). Типы (фации) метасоматоза скорректированы с учетом классических схем (Метасоматизм..., 1975; Метасоматизм..., 1998; Плющев и др., 1981, 2012).

Месторождения Белая Гора, Лунное-Карадуб, Хинганское, Кондер, Агние-Афанасьевское, Ночной (табл. 1, рис. 1) связаны с малыми либо субвулканическими интрузиями в вулканоплутонических поясах и отличаются контрастной зональностью метасоматитов, поэтому гамма-спектрометрические характеристики разных типов метасоматоза определяются легко. В моделях метасоматоза нами учитывались литературные данные (Геодинамика..., 2006; Копылов и др. (2004); Минина и др., 2019; Мишин, 1999; Моисеенко, Эйриш, 1996; Проблемы..., 2016; Романовский, Копылов, 2009; Сушкин, 2006; Юшманов (2018). Использованы также наиболее точные и крупномасштабные фондовые данные: кроме перечисленных отчетов они включают работы^{7, 8, 9}.

По участку Ночному использована схема метасоматоза, описанная в (Геодинамика..., 2006), она согласована с теоретическими представлениями о моделях. При этом имелась альтернативная, фондовая схема метасоматоза Н.И. Ситникова⁷, который ограничился фактическими описаниями метасоматитов, без попыток определения их фациальной принадлежности.

Образцом модели метасоматоза, по нашему мнению, может служить работа И.Н. Шестерневой (1986), проводившей на месторождении Хинганском детальные специализированные петрографо-геохимические исследования с целью определения фаций метасоматоза (рис. 1, 2). Все основные результаты отчета включены в кандидатскую диссертацию И. Н. Шестерневой (Шестернева, 1986), которая независимо и четко подтверждает разницу в характеристиках

³ Никитин. Ю.И. Карта прогноза СССР на золото масштаба 1:500000, Северный Сихотэ-Алинь (лист М-54-А), Ф. ДТФГИ, 1987. 254 с.

⁴ Бруско Э.Н. Отчет о результатах поисковых работ на рудное золото в пределах Агние-Афанасьевского рудного узла и его флангов. 1989. ДТФГИ, 1989. 145 с.

⁵ Крыков В.В. Отчет о результатах поисковых геолого-геофизических работ в юго-западной части Олонойско-Карадубской площади. ДТФГИ. 1983. 190 с.

⁶ Крыков В.В. Отчет о результатах поисковых геолого-геофизических исследований на флангах Олонойского, Карадубского и Березово-Хинганско-го рудных полей. ДТФГИ. 1996. В 3-х кн.

⁷ Вертоградов В.В., Лысенко О.Д. Отчет о результатах поисковых геолого-геофизических работ масштаба 1:25000 на рудном поле проявления Ночной. 1993. Ф. ДТФГИ. 73 с.

⁸ Емельяненко Е.П., Фоменко А.С., Масловский А.И. и др. Геологическое строение и полезные ископаемые верховьев руч. Кондер. Отчет Кольцевой партии о результатах геологической съемки масштаба 1:25000 и поисковых работ в верховьях руч. Кондер за 1985–1991 г.г., в 2-х томах. Хабаровск, 1991. 328 с.

⁹ Шевченко Б.В., Кошкарев А.Ю., Бородин А.М. и др. Геологическое строение и полезнее ископаемые бассейнов среднего течения р.р. Омня, Уоргалан, верхнего течения р. Ичас. Отчет Уоргаланской партии о результатах ГГС масштаба 1:50000 и общих поисков за 1986-1990 г.г. Хабаровск, 1990. 306 с.

ТЕМПЕРАТУРА, ВОДОРОДНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ



Рис. 2. Карты значений отношений ЕРЭ (a, δ) и гидротермально-метасоматически измененных пород (a) Хинганского месторождения с учетом данных (Шестернева, 1986) (слева) и по аэрогеофизическим данным (справа). Типы метасоматоза: 1 - слабые изменения; 2 - пропилиты кварц-эпидотовые; 3 - пропилитоиды кварц-серицитовые, турмалин-хлоритовые; 4 - кварц-гидрослюдистая фация; 5 - автометасоматиты; $\delta -$ проявления (a) и месторождение (δ); 7 - зоны низкотемпературных метасоматитов.

Fig. 2. Maps of the NRE ratios (a, δ) and hydrothermally and metasomatically altered rocks (b) of the Hinggan Deposit (data after Shesterneva, 1986) (left) and according to aerogeophysical data (right). Types of metasomatism: 1 - weakly altered; 2 - quartz-epidote propylites; 3 - quartz-cericite, tourmaline-chlorite propylitoids; 4 - quartz-hydromicaceous facies; 5 - autometasomatites; 6 - occurrences (a) and deposits (δ) ; 7 - low-temperature metasomatite zones.

Таблица 1. Характеристики отношений ЕРЭ наиболее распространенных фаций (типов) метасоматитов Приамурья

№ Мета		оматоз	атоз Эталонный рудный		Характеристики фона СФЗ $\overline{C_j}$			Экстремальные значения отноше- ний ЕРЭ <i>С_{iiex}</i>			
11/11	Фация (тип)	Группа, подгруппа ^{*1}	объект*2	U/Th	$K/Th, 10^{+4}$	U/K, 10 ⁻⁴	U/Th	$K/Th, 10^{+4}$	U/K, 10 ⁻⁴		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	Аргиллизиты	кварц- светлослюдистая однородная	Белая Гора 53°33' с.ш. 140°21' в.д.	0.27	0.28	1.02	до 1.2	фон- ниже фона	до 5.0		
2	Вторичные кварциты	кварц- светлослюдистая однородная	Белая Гора	0.27	0.28	1.02	фон	до 0.05	до 3.5		
3	Кварц- турмалиновые	кварц- светлослюдистая неоднородная	Лунное- Карадуб 49°09' с.ш. 131°51' в.д.	0.33	0.30	1.12	фон	до 0.05	до 3.5		
4	Пропилиты кварц- эпидотовые	темноцветная однородная	Хинганское	0.32	0.29	1.20	до 0.8	до 1.3	ниже фона		
5	Пропилитоиды кварц- серицитовые, турмалин- хлоритовые	темноцветная неоднородная	Хинганское 49°7' с.ш. 131°9' в.д.	0.32	0.29	1.20	ниже фона	до 1.0	много ниже фона		
6	Оливинитовые, диопсиди- рованные	ультраосновная- щелочная	Кондер 57°35' с.ш. 134°39' в.д.	0.36	0.28	2.15	до 0.45	до 1.35	до 10.0		
7	Полевошпат- пироксеновые	ультраосновная- щелочная	Кондер 57°35' с.ш. 134°39' в.д.	0.36	0.28	2.15	фон	до 0.1	до 0.75		
8	Титаномагнетит- биотитовые	ультраосновная- щелочная	Кондер 57°35' с.ш. 134°39' в.д.	0.36	0.28	2.15	до 0.15	до 0.20	до 4.0		
9	Кварц- адуляровые, кварц- полевошпатовые	полевошпатовая неоднородная	Агние-Афа- насьевское 51°56' с.ш. 138°46' в.д.	0.34	0.26	1.50	фон	до 1.3	до 0.05		
10	Биотит-сидеро- филлитовые (биотититы)	полевошпатовая неоднородная	Ночной 48°37' с.ш. 138°28' в.д.	0.45	0.25	1.85	до 0.85	фон	до 2.9		
11	Кварц- серицитовые (филлизиты)	кварц- светлослюдистая неоднородная	Ночной 48°37' с.ш. 138°28' в.д.	0.45	0.25	1.85	до 0.63	фон	до 2.25		

Table 1. The NRE ratio characteristics of the most widespread facies (types) of metasomatites in Pria	ımurye
---	--------

Примечания. *1. Группа, подгруппа метасоматоза дана с учетом таблиц из работы (Плющев и др., 2012). *2. В графе 4 указаны наименования разнотипных магматогенных рудных объектов-эталонов, описание которых дано в работе (Геодинамика..., 2006). С учетом площади и интенсивности, тип метасоматоза проявлен здесь максимально. Разнотипные объектов должны отличаться по величине хотя бы одной составляющей отношений ЕРЭ, а также по особенностям метасоматической зональности. *3. Метасоматиты рудного объекта Ночной определены по предварительной версии метасоматической модели С.М. Родионова, которая описана в работе (Геодинамика..., 2005). Детали модели приведены в отчете по Ночному рудному полю (Вертоградов, Лысенко и др., 1993)⁷.

Notes. *1. Group and subgroup of metasomatism is given following the table compiled by (Plyushchev et al., 2012). *2. Column 4 indicates the names of the standard magmatogenic ore objects of different types described in (Geodynamics..., 2006). Given the area and intensity, the type of metasomatism is manifested here to a maximum extent. The ore objects of different types should differ in the value of at least one NRE ratio component, as well as in the specific features of the metasomatic zoning. *3. The Nochnoy ore object metasomatites are determined by the preliminary version of the metasomatic model of S.M. Rodionov, which is described in (Geodynamics..., 2006). The details can be found in: Report on the Nochnoy orefield (Vertogradov , Lysenko et al., 1993)⁷.

метасоматитов разных фаций (рис. 2). Именно, метасоматиты внешней и внутренней зоны рудного поля Хинганское, близкие по составу, но различные по фациальным условиям образования, (по (Шестерневой, 1986), относящиеся к разным типам пропилитоидов), выделяются контрастной зональностью в полях отношений ЕРЭ.

По данным, приведенным в табл. 1, рассчитаны экспериментальные стандартизованные по величине доверительного интервала надфоновые характеристики отношений ЕРЭ:

$$C_{ij} = \frac{C_{ijex} - \overline{C_{ij}}}{\Delta}$$

где $C_{ijex} = U / Th_{ex}, K / Th_{ex}, U / K_{ex}$ —экстремальные значения отношений ЕРЭ, \overline{C}_{ij} — средние (фоновые) значения этих величин, ∆ — доверительный интервал (для *U*/*Th*, *K*/*Th* – 0.1, для *U*/*K* – 0.25). Величины водородного показателя рН и абсолютной температуры Т (табл. 2) определены с низкой точностью по литературным данным (Метасоматизм., 1998; Соколов., 1998; Плющев и др., 1981, 2012). Общеизвестно, тип метасоматоза можно достоверно определить только в процессе массовых и специальных петрографических исследований, но эта задача редко в полном объеме решается при изучении месторождений. Приведем доказательство не только принципиальной возможности, но однозначности решения задачи картирования метасоматитов по фактическим, достаточно неточным геологогеофизическим данным.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Построены два варианта нормированных графиков корреляции $pH = f(C_{ii}), T = f(C_{ii})$:

– рассчитанные по отношению к среднему фону гранитно-метаморфического слоя с параметрами (U/Th = 0.25, $K/Th = 0.28 \times 10^{-4}$, $U/K = 1.28 \times 10^{+4}$) (Володькова, 2016);

 по отношению к фону конкретных структурно-формационных зон, включающих эталонные рудные объекты (табл. 1, рис. 3).

Графики надфоновых аномалий отношений ЕРЭ C_{ij}^1 , рассчитанные по гранитно-метаморфическому слою, представляют собой кривые неправильной формы (рис. 3). Графики аномалий, надфоновых по отношению к фону СФЗ практически аналитические кривые, очень близкие по форме к эллипсам и вырожденным гиперболам. Такое различие наглядно доказывает верность принципа постоянства отношений ЕРЭ: если при картировании метасоматитов учитывается фон СФЗ, точность построений резко возрастет (Володькова, 2016; Глубинное..., 2010).

Процессы регионального метасоматоза формируют инфильтрационно-диффузионные

системы концентрически-кольцевой формы, с шириной каждой зоны более километра. Термодинамический потенциал инфильтрационно-диффузионной системы определен В.А. Жариковым в классической работе (Метасоматизм..., 1998):

$$dF = -SdT - pdV + \sum \mu_a dm_a - \sum m_i d\mu_i - \sum \mu_i dC_i - \delta Q$$
(1)

Здесь *S*, *T* — энтропия и абсолютная температура; *p*, *V* — давление и объем; δQ — некомпенсированное тепло (пренебрежимо мало), μ_i, μ_j, μ_k — химические потенциалы вполне подвижных компонентов; μ_a, μ_b, μ_c — химические потенциалы инертных компонентов, $m_a...m_c$ массы инертных компонентов; $m_i...m_k$ — массы вполне подвижных компонентов; C_i, C_j, C_k — концентрации вполне подвижных ЕРЭ в растворе.

Подробности о слагаемых термодинамического потенциала и их размерностях даны в специальной литературе (Барсуков, Дмитриев, 2015; Беляев, Кугун, 2018)

Вклассических моделях (Коржинский, 1969, 1973, 1993; Метасоматизм..., 1998; Плющев и др. 2012; Киреева, 2016) предполагалось, что при региональном инфильтрационном метасоматозе, в близких к равновесным, условиях, вполне подвижные ионы переносятся водными растворами и флюидами на значительные расстояния, взаимодействуя с окружающими породами. Д.С. Коржинский (1973) отмечал, что на перенос высоко подвижных ионов должны влиять физические поля, но влиянием этих факторов предлагал пренебречь, так как рассматривал исключительно породообразующие окислы. Таким образом, в классических моделях, при условиях, близких к равновесным, общий потенциал системы dA равен термодинамическому и близок к нулю; кроме того, $-SdT-pdV \approx 0$.

Рассеянные высокоподвижные радиоактивные элементы подвержены электролитической диссоциации, двигаются под воздействием, преимущественно, электрического поля Земли и электрохимического потенциала (Киреева, 2016; Комаров, 1994; Физическая..., 2004). Влияние электромагнитных полей на процессы метасоматоза подтверждается прямой корреляцией на профиле аномалий отношений и градиентов отношений ЕРЭ с аномалиями электрического сопротивления по данным магнитотеллурического зондирования. В зонах разломов доказана глубинная природа таких аномалий, характеризующих метасоматиты (Володькова, 2016). Степень диссоциации ЕРЭ в процессах глубинного регионального метасоматоза неизвестна, ЕРЭ теоретически могут переноситься как в атомарном состоянии, так и в виде комплексных ионов. Предположительно,

	1 <i>y</i> , 1 ,							
N⁰	Тип	Значен отноі	ия надфо цений ЕРЗ	новых Э С _{ії}	Водорс показат	дный ель <i>рН</i>	Абсолютная температура <i>Т</i>	
п/п	метасоматоза	δU/Th	$\delta K/Th$	δU/K	Вариации	Среднее	Вариации	Среднее
1	Аргиллизиты	9.3	-0.5	15.9	2-5	4.4	50-300	225
2	Вторичные кварциты	0	-2.3	9.9	1-5	2.7	300-500	400
3	Кварц-турмалиновые	0	-2.5	9.5	3.4-5.0	4.7	400-600	525
4	Пропилиты	4.8	10.1	-4.0	3-10	7.8	50-300	225
5	Пропилитоиды кварц-серицитовые, турмалин-хлоритовые	-1.0	7.1	-7.0	3.5-5.5	6.0	250-450	400
6	Оливинитовые, диопсидированные	0.9	10.7	31.4	-	8.0	900-1000	1000
7	Полевошпат- пироксеновые	0	-1.8	-5.6	7-10	8.5	600-950	800
8	Титаномагнетит- биотитовые	-2.1	-0.8	7.4	5.5-8.5	7.0	1200-1400	1300
9	Кварц-адуляровые, кварц-полевошпатовые	0	10.4	-5.8	4-5.5	4.5	350-600	500
10	Кварц-силикатные (биотититы) ^{*1}	4.0	0	4.2	4.5-6.5	5.5	400-600	550
11	Кварц-серицитовые (филлизиты)	1.8	0	1.6	4-5	4.5	200-400	300

Таблица 2. Экспериментальные значения C_{ij} , *pH*, *T* метасоматитов **Table 2.** Experimental C_{ij} , *pH*, and *T* values of metasomatites

Примечание. *1 C_{ij} — величины нормированных надфоновых отношений $\delta U/Th$, $\delta K/Th$, $\delta U/K$, pH — водородный показатель, T — абсолютная температура: эти три характеристики однозначно определяют тип метасоматоза.

Note. *1 C_{ij} indicates the normalized NRE $\delta U/Th$, $\delta K/Th$, and $\delta U/K$ ratio values above the background level, pH is the pH indicator, T is the absolute temperature; these three characteristics unequivocally determine the type of metasomatism.

с учетом максимальной подвижности и высокой степени диссоциации калия, по сравнению с ураном и торием, уран и торий переносятся в форме отрицательных ионов, калий — противоположно направленных положительных ионов. Электрохимический процесс обусловлен наличием величины химического потенциала и электродвижущей силы (Жерин, Амелина, 2009; Комаров, 1994; Физическая..., 2004). Исключив из формулы (1) незначимые составляющие, с учетом величины электродвижущей силы, получим характеристику электрохимического потенциала региональной метасоматической колонки или уравнения метасоматоза (V= const):

$$dA = \sum \mu_a dm_a - \sum m_i d\mu_i - \sum \mu_i dC_i - -zF \sum n_i * d(\Delta \varphi) = 0$$
(2)

Здесь \overline{z} — валентность, F — число Фарадея (≈9.65 Кл/моль), $\sum n_i$ — суммарное количество молей диффундирующих ионов, φ — потенциал регионального электрического поля.

регионального электрического поля. Потенциал величины $\sum \mu_a dm_a = const$ определяется инертными, постоянными составляющими гидротермально-метасоматической системы. При выраженном метасоматозе (полном замещении минералов) вся энергия электрического поля преобразуется в химические окислительно-восстановительные процессы, формирующие опережающий фронт кислотнощелочного замещения (Коржинский, 1967, 1969, 1973, 1993), активность раствора определяется значением водородного показателя кислотности $pH = -\log[H^+] = -2.3 * \ln[H^+]$, где H^+ — концентрация ионов водорода в растворе. Движущая сила (активность) водной фазы и растворенных в ней компонентов (Комаров, 1994; Метасоматизм..., 1998; Физическая..., 2004):

$$d(\Delta \varphi) = -2.3 * \mu_h RT * d(\ln pH) =$$

= -2.3 * $\mu_h \frac{RT}{pH} * d(pH)$ (3)

Здесь μ_h — химический потенциал водорода.

Вклад любой подвижной компоненты в выражение электрохимического потенциала системы:

 $dA_i = m_i d\mu_i + \mu_i dC_i + z_i F \sum n_i * d(\Delta \varphi)$ (4) При расчете фона зон регионального метасоматоза, который определяется преимущественно инфильтрационными процессами, можно

ТЕМПЕРАТУРА, ВОДОРОДНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ



Рис. 3. Графики распределения надфоновых аномалий ЕРЭ, нормированных: *1* — по фону СФЗ; *2* — по гранитно-метаморфическому слою; *3*, *4* — соответствующие фигуративные точки типов метасоматоза.

Fig. 3. The distribution plots of the NRE anomalous values above the background level, normalized to: 1 - the background level of the structural formation zones (SFZs); 2 - the granitic metamorphic layer; 3, 4 - consistent with the figurative points of the types of metasomatism.

принять $\mu_i dC_j$. В связи с упомянутым выше полным преобразованием энергий (электрической в химическую), они равны по величине, но противоположны по знаку. Окончательно, при T = const, C = f(x), $\mu_i = f(x)$, pH = f(y), дифференцируя общий потенциал A_i по осям x, y получим:

$$\frac{dA_i}{dx} + \frac{dA_i}{dy} = \frac{m_i d\mu_i}{dx} +$$

$$+2.3z_i F \sum n_i * \mu_h RT * \frac{d(\ln pH)}{dy} = 0$$
(5)

Для определения μ_i любой термодинамической системы используется выражение (Коржинский, 1993) $\mu = \mu_{0a} + RT \ln C$ (6), где μ_{0a} —

версальная газовая постоянная, *T* — абсолютная температура, *C* — активность или концентрация в идеальном растворе.

стандартный химический потенциал, *R* — уни-

Переход от концентраций отдельных компонент к их отношениям упростит решение уравнения (5) и уменьшит число переменных, для чего ниже даются преобразования. При отсутствии температурного градиента в гидротермально-метасоматической системе ($dT \approx 0$) для любой пары естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ) в каждый момент времени dt их содержания в твердой породе и в растворе пропорциональны (они переходят в раствор с разной, но постоянной скоростью), поэтому:

$$\frac{m_i}{m_j} = m_{ij} = k \frac{C_i}{C_j} = k C_{ij},$$

где m_{ij} , C_{ij} — величины отношения масс и концентраций элементов, i,j — компоненты, k = const — коэффициент пропорциональности. Для любого значения отношения элементов при наличии градиента химического потенциала ($\Delta \mu_i \neq 0$) из формулы (6) получим:

$$(\mu_{i} - \mu_{0i}) - (\mu_{j} - \mu_{0j}) = \Delta \mu_{ij} =$$

$$= RT \ln \frac{C_{i}}{C_{j}} = RT \ln C_{ij}$$
(7)

Пусть в процессе интенсивного метасоматоза радиоактивные элементы, в связи с их относительно высокой подвижностью, полностью переходят в раствор. Тогда общее количество диффундирующих пар

$$\sum n_{ij} = \frac{kC_{ij}}{m_0} * V ,$$

где V— объем молей раствора, m_0 — масса одной пары ионов отношений ЕРЭ. В идеале каждая зона регионального метасоматоза сложена однородными метасоматитами определенного состава с постоянным, близким к экстремальному, значением отношений ЕРЭ. При расчете валентности диффундирующей пары ЕРЭ

$$\Delta z_{ij} = \frac{z_i}{z_j}$$

применялось правило скалярного произведения векторов:

$$\Delta z_{ij} = \frac{|z_i|}{|z_j|} * \cos \alpha ,$$

где α — угол между векторами потоков положительных и отрицательных ионов (Барсуков, Дмитриев, 2015; Жерин, Амелина, 2009). С учетом сказанного выше о валентности ЕРЭ, для значений $\Delta C_{ij} = U/Th$, $\Delta z_{ij} = 2/2 \times cos0 = 1$; для K/Th валентность $\Delta z_{jk} = 1/2 \times cos180 = -1/2$, для $U/K - \Delta z_{ik} = -2$.

Окончательно:

$$m_{0} \times \sum n_{ij} \times RT \times \frac{d(\ln C_{ij})}{dx} + 2.3\Delta z_{ij}F \times \mu_{h}RT \times \sum n_{ij}\frac{d(\ln pH)}{dy} = 0.$$
(8)

После сокращения постоянных, уравнение (8) зависит только от трех переменных C_{ij} , *Ти рН* и легко решается в частных производных.

Интегрируя при T = const, получаем в правой части величину $M_0 = const > 0$. Уравнение (8) имеет решение $C_{ij} = k_1 e^{x^2}$, $pH = k_2 e^{y^2}$, где k_1 , k_2 некоторые постоянные (Бабичева, Болдовская, 2010). Графическая связь между величинами C_{ij} и pH выражается каноническим уравнением эллипса вида:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{\Delta z_{ij} * y^2}{b^2} = 1.$$

Постоянные k_1 и k_2 определяются через значения полуосей (рис. 2). Уравнение верно для уран-ториевого отношения ($\Delta z_{ij} > 0$), для прочих величин отношений ($\Delta z_{ij} < 0$) уравнение преобразуется в вырожденную гиперболу вида:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{\Delta z_{ij} * y^2}{b^2} = 1.$$

Полное соответствие теории и эксперимента, с учетом формы кривой на рис. 2, подтверждают сделанные выше предположения о валентности и знаке ионов, содержащих ЕРЭ.

Пусть $T = f(C_{ij}, y), \Delta C_{ij} = f(x)$ — переменные, pH = const, тогда из уравнения (4), дифференцируя по нормали η к вектору движения частиц, используя правило производной произведения, получим:

$$\frac{1}{\Delta z_{ij}} \times \frac{\partial (T * \ln C_{ij})}{\partial \eta} d\eta =$$

$$= \frac{1}{\Delta z_{ij}} (\frac{\partial T}{\partial \eta} \times \ln C_{ij} + \frac{\partial (\ln C_{ij})}{\partial \eta} \times T) d\eta = 0$$
(9)

или

$$\frac{1}{\Delta z_{ij}} \left[\frac{\partial \ln T}{\partial \eta} + \frac{\partial (\ln(\ln C_{ij}))}{\partial \eta}\right] d\eta = 0$$
(10)

$$T = -k_3 \times \frac{1}{\Delta z_{ij}} \times \ln C_{ij} \times \eta , \qquad (11)$$

где $\eta = f(x, y), k_3 = const.$

Отсюда, подставляя решение $C_{ij} = k_1 * e^{x^2}$,

$$\frac{1}{\Delta z_{ij}} \int \frac{\partial (T \times \ln C_{ij})}{\partial \eta} d\eta = \frac{k_3}{\Delta z_{ij}} \times \eta = c , \qquad (12)$$

где c = const.

Каноническое уравнение нормали

$$\frac{x - x_a}{f'(x_a)} = \frac{y - y_b}{f'(y_b)} = c,$$
(13)

где $x \equiv x^2, y \equiv x^{-2}$.

Если x_a , y_b — фиксированные координаты точки пересечения нормали и кривой $T = f(C_{ij})$, тогда $f'(x_a)$, $f'(y_b)$, c — постоянные; уравнение можно записать в виде (Бабичева, Болдовская, 2010):

$$\frac{k_3}{\Delta z_{ij}}\eta = \frac{k_3}{\Delta z_{ij}} \times (\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}) = c .$$
(14)

Для *U*/*Th* ($\Delta z_{ij} = 1$) зависимость температур и значений отношений ЕРЭ преобразуется в вырожденную гиперболу; для *U*/*K* ($|\Delta z_{ij}| = 2$) и *K*/*Th* ($|\Delta z_{ij}| = \frac{1}{2}$), она представляет собой эллипс.

Таким образом, все теоретические расчеты находятся в полном соответствии с результатами эксперимента (табл. 1, 2, рис. 3), набор характеристик C_{ij} , *pH*, *T* однозначно характеризует метасоматические фации. Это позволяет сделать вывод о том, что значения отношений содержаний

ЕРЭ в зависимости от степени метасоматоза, растут по экспоненте, выходя на асимптоту при полном замещении породы вторичными минералами. Уравнение эллипса описывает распределение максимальных концентраций всех типов измененных пород, формирующих метасоматическую колонку и определяет закон движения заряженных частиц радиоактивных веществ в потенциальном электрическом поле Земли. Расстояние между фокусами эллипса зависит от разности потенциалов поля.

Экспериментально тип метасоматитов, степень изменения и другие количественные характеристики пород определены приближенно, поэтому необходимо оценить точность графического подбора кривых. Проекции по перпендикуляру на кривую аппроксимации фигуративных точек C_{ij} образуют значения кажущегося C_{ijk} , затем определяются расхождения $\Delta r = C_{ijk} - C_{ij}$, а также величины Δc_{ij} и σ_{ij} . Здесь

$$\Delta c_{ij} = \frac{\sum \Delta_r}{n}$$
 —систематическая, $\sigma_{ij} = \sqrt{\frac{\sum \Delta_r^2}{n-1}}$ –

среднеквадратическая погрешность подбора графиков (рис. 3). Точность подбора кривых считается допустимой, если во всех случаях $\Delta c_{ii} < 1$, $\sigma_{ii} < 1$ (меньше нормированной величины доверительного интервала). Экспресс-оценка по графикам эллипсов подтверждает это, так как во всех случаях $|\Delta r| \ll 1$. Для уран-ториевого отношения $\Delta c_{12} = -0.06 << 1$, $\sigma_{12} = 0.14 << 1$ отмечаются аномальные отклонения для фигуративных точек 10, 11 (эти данные нуждаются в уточнении типа метасоматоза). Калий-ториевое отношение характеризуется аналогичными погрешностями $\Delta c_{23} = +0,01<<1, \sigma_{23} = 0.10<<1,$ уранкалиевое отношение определяется значениями $\Delta c_{13} = +0.054 << 1, \sigma_{13} = 0.32 << 1.$ Для систематической и среднеквадратической погрешностей $\Delta cij, \sigma ij$ значений температуры и водородного показателя кислотности допустимые расхождения соответственно должны быть не выше $\Delta T = 100$ градусов, $\Delta pH = 1$. Фактически погрешности аппроксимации ДрН составляли: $\begin{array}{l} \Delta c_{12} = -0.20 <<1; \sigma_{12}(pH) = 0.69 <1; \Delta c_{23}(pH) = 0.08 <<1; \\ \sigma_{23}(pH) = 0.28 <<1; \ \Delta c_{23}(pH) = 0.03 <<1; \ \sigma_{23}(pH) = \end{array}$ 0.28<<1 (все в пределах нормы). Погрешности расхождений между аппроксимированными и фактическими значениями $T: \Delta c_{12}(T) = -40 << 100;$ $\sigma_{12}(T) = 37 << 100; \ \Delta c_{23}(T) = -20 << 100; \ \sigma_{23}(T) =$ $68 < 100; \Delta c_{13}(T) = -37 < < 100; \sigma_{13}(T) = 83 < 100.$

Формально графическая аппроксимация достаточно точна, но этого мало для оценки достоверности решения, ведь тип метасоматоза зависит от трех грубо определенных параметров C_{ii} , T, pH.

Приведем алгоритм расчета суммарной погрешности, учитывающей влияние всех трех факторов. Если для суммарной погрешности

величина расхождения будет меньше допустимой, результат считается достоверным и может использоваться для эталонной количественной характеристики метасоматоза.

Алгоритм расчета:

1. Определим значения кажущихся отношений ЕРЭ, C_{ijk1} и C_{ijk2} по двум кривым $pH = f(C_{ij})$ и $T = f(C_{ij})$; рассчитаем величину расхождения между ними $\Delta_{eij} = C_{ijk1} - C_{ijk2}$, а также систематические (Δc_{eij}) и среднеквадратические (σ_{eij}) погрешности расхождений;

2. Если для величин любых отношений ЕРЭ выполняется условие $\Delta c_{eij} < 1$, $\sigma_{eij} < 1$, все параметры ΔC_{ii} считаются близкими истинным.

3. По двум кривым рассчитывается среднеарифметическое значение $C_{eij} = \frac{1}{2}(C_{ijk1} + C_{ijk2})$ экспериментальной величины отношения ЕРЭ;

4. По графикам кривых $pH = f(C_{ij})$ и $T = f(C_{ij})$, в зависимости от величины C_{eij} , определяем значения $pH_{rij} = f(C_{eij})$, $T_{rij} = f(C_{eij})$ и в зависимости от значений C_{ijk} определяем по тем же графикам соответствующие характеристики pH_{iik} и T_{iik} .

5. Определяем расхождения величин pH_{rij} , T_{rij} с кажущимися графическими:

 $\Delta_{rij}(pH) = pH_{rij} - pH_{ijk}, \ \Delta_{rij}(T) = T_{rij} - T_{ijk};$

6. Подсчитаем систематические и среднеквадратические погрешности определения расхождений $\Delta_{rij}(pH)$, $\Delta_{rij}(T)$: если $\Delta c(\Delta_{rij}(pH)) < 1$, $\sigma(\Delta_{rij}(pH)) < 1, \Delta c(\Delta_{sij}(T)) < 100, \sigma(\Delta_{rij}(T)) < 100$, характеристики pH_{ijk} , T_{ijk} определены достаточно точно.

7. По формулам $pH_{eij} = \frac{1}{2}(pH_{ijk} + pH_{rij})$, $T_{eij} = \frac{1}{2}(T_{ijk} + T_{rij})$ рассчитываем экспериментальные характеристики водородного показателя и температуры; если значения ΔC_{eij} , pH_{eij} , T_{eij} близки к типичным для полнопроявленных метасоматитов, итерация завершена. Расчеты погрешностей согласно алгоритму, приведены в табл. 3–5.

По данным расчетов, с учетом погрешностей измерения, экспериментальные значения отношений ЕРЭ близки к типичным для метасоматитов. Из таблиц 3, 4, 5 для каждого типа метасоматитов определяем средние значения *pH_e*, *T*:

$$p\dot{H}_{s} = \frac{1}{3} (pH_{e12} + pH_{e23} + pH_{e13}),$$

$$T_{s} = \frac{1}{3} (T_{e12} + T_{e23} + T_{e13}).$$

Определим средние систематические и среднеквадратические расхождения всех значений pH_{eij} , T_{eij} и соответствующих средних характеристик. Для всех типов метасоматоза они гораздо ниже допустимых: $\Delta c(pH_s) = -0.01 <<1$, $\sigma(pH_s) = 0.3 <<1$; $\Delta c(T_s) = -0.03 <<100$ (град), $\sigma(T_s) = 52.9 <<100$ (град). Первая итерация достаточно точна, характеристики метасоматитов pH_s , T_s можно считать эталонными.

№ типа		Характеристики расхождений Δ_{eij} , значений отношения ЕРЭ, определенные по графикам зависимости $pH = f(C_{ij})$, $T = f(C_{ij})$													
мета- сома-	Для значений <i>C</i> ₁₂ = <i>U</i> / <i>Th</i>				Для	Для значений <i>C</i> ₂₃ = <i>K</i> / <i>Th</i> , 10 ⁻⁴				Для значений <i>C</i> ₁₃ = <i>U</i> / <i>K</i> , 10 ⁺⁴					
тоза	C_{eijk1}	C_{eijk2}	C _{eij}	C _{eij}	C _{eijk1}	C _{eijk2}	Δ_{eij}	C _{eij}	C_{eijk1}	C _{eijk2}	Δ_{eij}	C _{eij}			
1	9.0	9.3	-0.3	9.15	-0.5	-0.4	-0.1	-0.45	15.6	15.6	0	15.6			
2	0.25	0.1	+0.15	0.18	-2.5	-2.1	-0.4	-2.3	10.4	10.8	-0.4	10.6			
3	-0.15	-0.15	0	-0.15	-2.3	-2.3	0	-2.3	9.2	10.2	-1.0	9.7			
4	4.8	4.8	0	4.8	+10.3	+9.8	+0.5	10.05	-4.0	-4.0	0	-4.0			
5	-1.1	-0.9	-0.2	-1.0	+7.2	+7.3	-0.1	+7.25	-7.2	-7.6	-0.4	-7.4			
6	1.0	0.6	+0.4	0.8	+10.7	+10.7	0	10.7	31.6	30.8	+0.8	31.2			
7	0	0.4	-0.4	0.2	-1.8	-2.1	0.3	-1.95	-6.0	-7.2	+1.2	-6.6			
8	-1.7	-2.0	+0.3	-1.85	-0.9	-0.4	-0.5	-0.65	7.2	8.0	-0.8	7.6			
9	-0.3	-0.1	-0.2	-0.2	+10.4	+10.4	0	+10.4	-6.0	-7.6	+1.6	-6.8			
10	3.8	3.5	+0.3	3.65	+0.2	-0.4	+0.6	-0.1	5.6	5.6	0	5.6			
11	1.6	1.9	-0.3	1.75	+0.1	-0.3	+0.4	-0.1	1.6	2.0	-0.4	1.8			
	$\Delta c_{e12} = -0.023$			$\Delta c_{e23} = 0.06$				$\Delta c_{e13} = 0.12$							
	$\sigma_{_{e12}} = 0.26$				$\sigma_{e23} = 0.35$				$\sigma_{e13} = 0.82$						

Таблица 3. Погрешности расчета характеристик отношений ЕРЭ **Table 3.** The calculation of the determination error for the NRE ratio value of metasomatites

Таблица 4. Погрешности расчета значений водородного показателя **Table 4.** The calculation of the determination error for the pH indicator value

Nº THE?		Характеристики расхождений $\Delta_{eij}(pH)$, значения водородного показателя pH_{eij}												
мета-	<i>pH</i> =	$= f(C_{12})$	$, C_{12} = U$	J / Th	pН	$pH = f(C_{23}), C_{23} = K / Th$				$pH = f(C_{13}), C_{13} = U/K$				
сома- тоза	pH_{ijk}	pH _{sij}	*1	pH _{eij}	pH _{ijk}	pH _{sij}	*1	pH_{eij}	pH_{ijk}	pH _{sij}	*1	pH _{eij}		
1	4.0	3.3	-0.7	3.7	4.5	4.4	-0.1	4.5	4.0	4.0	0	4.0		
2	3.9	4.0	+0.1	4.0	3.6	3.4	-0.2	3.5	4.4	4.2	-0.2	4.3		
3	4.2	4.0	-0.2	4.1	3.8	3.5	-0.3	3.7	4.2	4.0	-0.2	4.1		
4	7.6	7.8	+0.2	7.7	8.8	8.8	0	8.8	8.0	7.8	-0.2	7.9		
5	5.4	5.0	-0.4	5.2	5.3	5.2	-0.1	5.3	4.9	4.8	-0.1	4.9		
6	8.5	8.6	+0.1	8.6	8.8	8.8	0	8.8	8.0	8.1	+0.1	8.1		
7	8.6	8.6	0	8.6	7.9	7.8	-0.1	7.9	7.8	7.9	+0.1	7.9		
8	7.3	7.4	+0.1	7.4	7.9	7.9	0	7.9	7.8	7.8	0	7.8		
9	4.3	4.1	-0.2	4.2	4.6	4.3	-0.3	4.5	4.8	4.8	0	4.8		
10	2.0	2.1	+0.1	2.1	4.6	4.8	+0.2	4.7	4.4	4.4	0	4.4		
11	3.0	2.9	-0.1	2.9	4.5	4.7	+0.2	4.6	4.4	4.5	+0.1	4.5		
	$\Delta c(\Delta_{eij}(pH)) = -0.09$			$\Delta c(\Delta_{eij}(pH)) = -0.06$			$\Delta c(\Delta_{eij}(pH)) = -0.36$							
	$\sigma(\Delta_{eij}(pH)) = 0.28$				$\sigma(\Delta_{eij}(pH)) = 0.17$			$\sigma(\Delta_{eij}(pH)) = 0.13$						

Примечание. *1 — расхождения между значениями $\Delta_{eij}(pH)$

Note. *1 — discrepancies between values $\Delta_{\scriptscriptstyle eij}(pH)$

ТЕМПЕРАТУРА, ВОДОРОДНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ

	Таблица 5	. Пог	решности	расчетов	температуры
--	-----------	-------	----------	----------	-------------

Nº			Харак	температу	ры <i>Т_{еіј}</i>							
мета- сома- тоза	$T = f(C_{12}), C_{12} = U/Th$			$T = f(C_{23}), C_{23} = K / Th$				$T = f(C_{13}), C_{13} = U/K$				
	T _{ijk}	T _{sij}	*1	T _{eij}	T _{ijk}	T _{sij}	*1	T_{eij}	T _{ijk}	T _{sij}	*2	T _{eij}
1	220	220	0	220	240	260	+20	250	300	280	-20	290
2	430	420	-10	425	430	480	+50	455	210	220	+10	215
3	450	450	0	450	540	500	-40	520	200	210	+10	205
4	210	220	+10	215	380	420	+40	400	220	220	0	220
5	500	510	+10	505	260	250	-10	255	400	400	0	400
6	900	920	+20	910	1020	1040	+20	1030	1100	1080	-20	1090
7	920	940	+20	930	860	940	+80	900	840	800	-40	820
8	1300	1260	-40	1280	1140	1100	-40	1120	1300	1300	0	1300
9	440	460	+20	450	480	460	-20	470	330	360	+30	345
10	420	420	0	420	260	210	-50	240	160	180	+20	170
11	350	380	+30	365	260	230	-30	245	140	160	-20	150
$\Delta c(\Delta_{eii}(T) = +5.5$					$\Delta c(\Delta_{eij}(T)) = +1.8$				$\Delta c(\Delta_{eij}(T)) = -2.7$			
$\sigma(\Delta_{eij}(T)) = 20$					$\sigma(\Delta_{eij}(T)) = 42.9$				$\sigma(\Delta_{eij}(T)) = 20.7$			

Table 5. The calculation of the determination error for the temperature value of metasomatism

Примечание. *1 — расхождения между значениями $\Delta_{eij}(T)$. Note. *1 — discrepancies between values $\Delta_{eij}(T)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Набор эталонных значений C_{eij} , pH_s , T_s (табл. 6) однозначно определяет наиболее распространенные в Приамурье типы метасоматоза, если его ареалы существенно отличаются хотя бы по одной из трех величин надфоновых аномалий отношений ЕРЭ. Графически зависимости эталонных характеристик C_{ей}, pH_s, T_s выражаются эллипсами либо вырожденными гиперболами, что полностью соответствует численному решению дифференциального уравнения, связывающему эти величины. Экспериментальные данные в пределах доверительного интервала соответствуют теоретическим доказательствам и расчетам. Значения C_{ii} в зависимости от степени метасоматоза, растут по экспоненте. Уравнение эллипса определяет закон движения ионов радиоактивных веществ в растворах (расплавах) в электрическом поле Земли в процессах инфильтрационного метасоматоза. Оси эллипсов и вырожденных гипербол в идеальном случае должны быть параллельны осям координат. Закономерный наклон этих кривых объясняется, по-видимому, изменением степени электролитической диссоциации заряженных частиц при росте температуры и рНв процессах метасоматоза. Значительные погрешности характеристик отношений ЕРЭ метасоматитов

(биотититы, филлизиты) отмечаются на объекте Ночной, где есть сомнения по поводу достоверности определения их типа. В дальнейшем возможно уточнение эталонных характеристик, так как в последние десятилетия в Приамурье открыты новые крупные месторождения, обладающие хорошо изученными системами регионального метасоматоза. Кривые (рис. 3) для территории Приамурья универсальны и описывают любые региональные инфильтрационные системы метасоматоза, связанные с магматогенными месторождениями, в типичных для них интервалах температур, водородного показателя, концентраций ЕРЭ. Проведенные расчеты подчеркивают, что окислительно-восстановительный потенциал Д.С. Коржинского (1973), определяется именно влиянием электрических полей.

Эталонные значения отношений ЕРЭ могут использоваться для картирования метасоматитов и построения моделей регионального метасоматоза. Такие модели на этапе опережающих поисковых работ позволяет резко повысить эффективность при поисках руд металлов.

Автор выражает глубокую признательность к.т.н. В.А. Рашидову за существенную редакторскую переработку текста, способствующую его улучшению. Также он признателен рецензентам за важные и доброжелательные замечания.

N⁰	T	Знач	чения отно ний ЕРЭ С	ше-	Параметры метасоматоза			
п/п	типы метасоматоза	U/Th	$\frac{K/Th}{10^{-4}}$	U/K, 10 ⁺⁴	Водородный показатель <i>pH</i> s	Температура <i>T</i> _s , град		
1	Аргиллизиты	9.1	-0.5	15.6	4.1	253		
2	Вторичные кварциты	0.2	-2.3	10.6	3.9	365		
3	Кварц-турмалиновые	-0.2	-2.3	9.7	4.0	392		
4	Пропилиты	4.8	10.1	-4.0	8.1	278		
5	Пропилитоиды кварц-серицитовые, турмалин-хлоритовые	-1.0	7.3	-7.4	5.1	387		
6	Оливинитовые, диопсидированные	0.8	10.7	31.2	8.5	1010		
7	Полевошпат-пироксеновые	0.2	-2.0	-6.6	8.1	883		
8	Титаномагнетит-биотитовые	-1.9	-0.7	7.6	7.7	1233		
9	Кварц-адуляровые, кварц-полевошпатовые	-0.2	10.4	-6.8	4.5	422		
10	Кварц-силикатные (биотититы ?)	3.7	-0.1	5.6	3.7	277		
11	Кварц-серицитовые (филлизиты ?)	1.8	-0.1	1.8	4.0	253		

Таблица 6. Эталонные характеристики значений *Cij*, *pH*, *T* метасоматитов **Table 6.** Standard characteristics of metasomatites in Priamurye

Список литературы [References]

- Альтшулер М.И., Кузьмин Г.И. Крупномасштабный прогноз золоторудных объектов по комплексным аэрогеофизическим данным. Методическое пособие. Спб: Роскомнедра, ВИРГ-Рудгеофизика, 1993. 160 с. [Altshuler M.I., Kuzmin G.I. Large-scale forecasting of the gold-ore object from comprehensive airborne geophysical data. Manual. St. Petersburg: Roskomnedra, VIRG-Rudgeofizika, 1993. 160 p. (in Russian)].
- Бабичева И.В., Болдовская Т.Е. Справочник по математике (вформулах, таблицах, рисунках): Учебное пособие. Омск: СибАДИ, 2010. 148 с. [Babicheva I.V., Boldovskaya T.E. Reference book on mathematics (including formulae, tables, and figures): Manual. Omsk: The Siberian State Automobile and Higway University (SibADI), 2010. 148 p. (in Russian)].
- Барсуков В.И., Дмитриев О.С. Молекулярная физика и начала термодинамики. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО ТГТУ, 2015. 128 с. [Barsukov V.I., Dmitriev O.S. Molecular physics and basic principles of thermodynamics. Tambov: Tambov State Technical University Publishing House, 2015. 128 p. (in Russian)].
- Беляев А.П. Кугун В.И. Физическая и коллоидная химия. Учебник. М.: Изд-во ГЭОТАР-Медиа, 2018. 457 с. [Belyaev A.P., Kugun V.I. Physical and colloidal chemistry. Manual. Moscow: GEOTAR-Media Publishing House, 2018. 457 p. (in Russian)].
- Боярко Г.Ю. Количественная оценка погрешности подсчета прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых // Разведка и охрана недр. 2010. № 11. С. 11–15 [Boyarko G.Yu. Quantitative estimate of the calculation error for the expected reserves of the solid mineral resources // Razvedka i okhrana nedr. 2010. № 11. P. 11–15 (in Russian)].

- Володькова Т.В. Гамма-спектральные поля и распределение золото-редкометалльного оруденения в Нижне-Амурском регионе. Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Хабаровск, 1999. 29 с. [Volod'kova T.V. Gamma-spektral'nye polya i raspredelenie zoloto-redkometall'nogo orudeneniya v Nizhne-Amurskom regione. Avtoref. diss. kand. geol.-min. nauk. Khabarovsk, 1999. 29 p. (in Russian)].
- Володькова Т.В. Аномалии трендов отношений радиоактивных элементов на профиле Джалинда-Томмот // Литосфера. 2016. № 2. С. 24–47. [Volod'kova T.V. The trend anomalies of the radioactive element ratios on the profile Dzhalinda-Tommot // Lithosphere. 2016. № 2. Р. 24–47 (in Russian)].
- Володькова Т.В. Картирование метасоматитов Приамурья // Тез. докл. Физико-химические факторы петро- и рудогенеза: новые рубежи. М., 2019. С. 57–60. [Volod'kova T.V. Mapping of metasomatites in Priamurye. Abstracts Physical-chemical factors of petro- and ore genesis: New frontiers. Moscow, 2019. P. 57–60 (in Russian)].
- Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: в 2-хкн. / под ред А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука. 2006. Кн. 2, 573–981. [Geodynamics, magmatism, and metallogeny of Eastern Russia: in two books. / Edited by A.I. Khanchuk. Vladivostok: Dal'nauka, 2006. Book 2. P. 573–981. (in Russian)].
- Глубинное строение и металлогения Восточной Азии / отв. ред. А.И. Диденко, Ю.Ф. Малышев, Б.Г. Саксин. Владивосток: Дальнаука, 2010. 332 с. [Deep structure and metallogeny of Eastern Asia / Eds A.N. Didenko, Yu.F. Malyshev, and B.G. Saksin. Vladivostok: Dal'nauka, 2010. 332 p. (in Russian)].
- Жерин И.И., Амелина Г.Н. Основы радиогеохимии, методы выделения и разделения радиоактивных

ВЕСТНИК КРАУНЦ. НАУКИ О ЗЕМЛЕ. 2020. № 4. ВЫПУСК 48

элементов. Учебное пособие. Томск: Изд-во Томского Политехнического Университета, 2009. 106 с. [*Zherin I.I., Amelina G.N.* The fundamentals of radiogeochemistry, the radioactive element detection and separation methods. Manual (textbook) Tomsk: Tomsk Polytechnical University Publishing House, 2009. 106 p. (in Russian)].

- Зарайский Г.П. Эксперимент в решении проблем метасоматизма. М.: ГЕОМ, 2007. 136 с. [Zaraisky G.P. Experiment in the solution of the metasomatizm problems. М.: GEOM, 2007. 136 р. (in Russian)].
- Киреева Т.А. Гидрогеохимия. Основы региональной гидрогеохимии: Конспект лекций. М.: МГУ, 2016. С. 112–161 [*Kireeva T.A.* The basic principles of the regional hydrogeochemistry: Lectures. Moscow: Moscow State University, 2016. P. 112–161 (in Russian)].
- Комаров В.А. Геоэлектрохимия. Учебное пособие. СПб: Изд-во СПб университета, 1994. 136 с. [Komarov V.A. Geoelectrochemistry. Textbook. St. Petersburg: St. Petersburg University Publishing House, 1994. 136 p. (in Russian)].
- Копылов М.И., Плотницкий Ю.Е., Родионов С.М. и др. Хингано-Олонойский оловорудный район: геолого-геофизические характеристики, рудоносность, проблемы развития сырьевой базы. Владивосток; Хабаровск: ДВО РАН, МПР РФ, 2004. 251 с. [Kopylov M.I., Plotnitsky Yu.E., Rodionov S.M. et al. The Hinggan-Olonoy tin-ore district: geological-geophysical characteristics, ore potential, and the problems of development of the mineral resource base. Vladivostok; Khabarovsk: FEB RAS, Ministry of Nature Management of the Russian Federation, 2004. 251 p. (in Russian)].
- Коржинский Д.С. Режим кислотности и щелочнометалльности трансмагматических растворов // Проблемы кристаллохимии минералов и минерального рудообразования. Л.: Л.О. Наука, 1967. С. 163–169 [Korzhinsky D.S. The acidity and alkalimetal regime of the transmagmatic solutions // Problems of crystal chemistry of minerals and mineral formation formation. Leningrad: L.O. Nauka, 1967. P. 163–159 (in Russian)].
- Коржинский Д.С. Теория метасоматической зональности. М.: Наука, 1969. 112 с. [Korzhinsky D.S. The theory of metasomatic zoning. Moscow: Nauka, 1969. 112 p. (in Russian)].
- Коржинский Д.С. Основы метасоматизма и метамагматизма / Избранные труды. М.: Наука, 1993. 239 с. [Korzhinsky D.S. The basic principles of metasomatism and metamagmatism / Selected contributions (Izbrannye trudy). Moscow: Nauka, 1993. 239 p. (in Russian)].
- Коржинский Д.С. Теоретические основы анализа парагенезисов минералов. М.: Наука, 1973. 288 с. [Korzhinsky D.S. The theoretical principles of analysis of the mineral parageneses. Moscow: Nauka, 1973. 288 p. (in Russian)].
- Коробейников А.Ф. Рудно-метасоматическая зональность на золоторудных месторождениях палеозойских складчатых областей // Тез. докл. V Всесоюз. конф. Метасоматизм и рудообразование. Л., 1982. С. 117–118 [Korobeynikov A.F. The ore metasomatic zoning for the gold-ore deposits in the Paleozoic folded areas // Abstracts of the V-th All-Russian Conference «Metasomatism and ore formation». Leningrad, 1982. P. 117–118 (in Russian)].

- Коробейников А.Ф. Геология. Прогнозирование и поиск месторождений полезных ископаемых / учебник для бакалавриата и магистратуры. М.: Изд-во Юраст, 2019. 254 с. [Korobeynikov A.F. Geology. Forecasting and exploration of mineral deposits / Textbook for bachelors and magisters. Moscow: Yurast Publishing House, 2019. 254 р. (in Russian)].
- Метасоматизм и метасоматические породы / Ред. В.А. Жариков, В.Л. Русинов. М.: Научный мир, 1998. 492 с. [Metasomatism and metasomatic rocks / Eds. V.A. Zharikov, V.L. Rusinov. Moscow: Nauchny Mir, 1998. 492 p. (in Russian)].
- Метасоматизм и рудообразование. Под ред. Ю.В. Казицина. М.: Недра, 1975. 280 с. [Metasomatism and ore formation. Edited by Yu.V. Kazitsyn. Moscow: Nedra, 1975. 280 p. (in Russian)].
- Минина О.В., Мигачев И.Ф., Звездов В.С. Прогнознометаллогеническое районирование южной части Дальневосточного региона на медно-порфировое оруденение // Отечественная геология. 2019. № 1. С. 35-45 [*Minina O.V., Migachev I.F., Zvezdov V.S.* The southern Far East Region zoning for metallogenic forecasting of the copper-porphyry mineralization // Otechestvennaya geologiya. 2019. № 1. Р. 35-45 (in Russian)].
- *Мишин Л.Ф.* Гидротермально-измененные породы и перспективная оценка месторождения Белая Гора // Геология и полезные ископаемые Приамурья. Хабаровск, 1999. С. 72–76 [*Mishin L.F.* Hydrothermally altered rocks and perspective estimation of the Belaya Gora Deposit // Selection «Geology and mineral resources of Priamurye». Khabarovsk, 1999. P. 72–76 (in Russian)].
- *Моисеенко В.Г. Эйриш Л.В.* Золоторудные месторождения Востока России. Владивосток: Дальнаука, 1996. 352 с. [*Moiseenko V.G., Eirish L.V.* The gold-ore deposits of eastern Russia. Vladivostok: Dal'nauka, 1996. 352 p. (in Russian)].
- Плющев Е.В., Ушаков О. П., Беляев Г.М. и др. Измененные породы и их поисковое значение. М.: Недра, 1981. 264 с. [*Plyushchev E.V., Ushakov O.P., Belyaev G.M. et al.* The altered rocks and their exploration significance. Moscow: Nedra, 1981. 264 p. (in Russian)].
- Плющев Е.В., Шатов В.В., Кашин С.В. Металлогения гидротермально-метасоматических образований. Труды ВСЕГЕИ. Новая серия. Т. 354. СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012. 560 с. [*Plyushchev E.V., Shatov V.V., Kashin S.V.* Metallogeny of hydrothermal and metasomatic rocks. Contributions of the Russian Geological Research Institute (VSEGEI). New series. V. 354. St. Petersburg: Russian Geological Research Institute (VSEGEI) Publishing House, 2012. 560 p. (in Russian)].
- Проблемы геологии и эксплуатации месторождений платиновых металлов (I научные чтения памяти профессора В.Г Лазаренкова). СПб.: Изд-во СПбГУ, 2016. 184 с. [The problems of geology and exploitation of the platinum metal deposits (The I-st scientific readings in memory of Professor V.G. Lazarenkov). St. Petersburg: St. Petersburg State University Publishing House, 2016. 184 p. (in Russian)].
- Романовский Н.П., Копылов М.И. Петрофизические исследования метасоматитов оловорудных районов Юга Дальнего Востока России // Вестник ДВО РАН. 2009. № 4. С. 38–41 [Romanovsky N.P., Kopylov M.I. Petrophysical studies of metasomatites in tin-ore

ВЕСТНИК КРАУНЦ. НАУКИ О ЗЕМЛЕ. 2020. № 4. ВЫПУСК 48

regions of the Far East South of Russia // Vestnik DVO RAN. 2009. No. 4. P. 38–41 (in Russian)].

- Соболев А.О. Подходы в работе на всех этапах создания горнорудного предприятия // Сырьевая база и геологоразведка. 2011. № 2. С. 16–19 [Sobolev A.O. The approaches used at all stages of establishing a mining enterprise // Syr'evaya baza i geologorazvedka. 2011. № 2. Р. 16–19 (in Russian)].
- Соколов С.В. Структуры аномальных геохимических полей и прогноз оруденения. (Министерство Природных ресурсов Российской Федерации. Комитет Природных ресурсов Амурской области. ГГП «Амургеология»). СПб: Наука РАН, 1998. 154 с. [Sokolov S.V. The structures of the anomalous geochemical fields and forecasting of mineralization. (Ministry of Nature Management of the Russian Federation, the Committee of Nature Management of the Amur Area. The Geological-Geophysical Enterprise «Amurgeologiya»). St. Petersburg: Nauka RAN, 1998. 154 p. (in Russian)].
- Сушкин Л.Б. Кондер Дальневосточная жемчужина России // Наука и природа Дальнего Востока. 2006. № 2. С. 121–139 [Sushkin L.B. Konder — a pearl of Far Eastern Russia. // Nauka i priroda Dal'nego Vostoka. 2006. № 2. Р. 121–139 (in Russian)].
- Физическая химия. Ч. 4. Электрохимия: Текст лекций / сост. Г.С. Зенин, В.Е. Коган и др. СПб: СЗТУ, 2004. 107 с. [Physical chemistry. Pt. 4. Electrochemistry: Lectures / Compiled by G.S. Zenin, V.E. Kogan et al. St. Petersburg: NWOTU, 2004. 107 p. (in Russian)].
- Шестернева И.Н. Гидротермально измененные породы Ханганского оловорудного месторожде-

ния и их поисковое значение. Дисс. канд. геол.мин. наук. Хабаровск, 1986. 211 с. [Shesterneva I.I. Gidrotermal'no izmenennye porody Hanganskogo olovorudnogo mestorozhdeniya i ih poiskovoe znachenie. Diss. kand. geol.-min. nauk. Khabarovsk, 1986. 211 p. (in Russian)].

- *Юшманов Ю.Г.* Геолого-структурные особенности Агние-Афанасьевского месторождения в Нижнем Приамурье // Региональные проблемы. 2018. Т. 21. № 3. С. 15–21 [*Yushmanov Yu.G.* The geologicalstructural features of the Agnie-Afanasyev deposit in Lower Priamurye // Regional problems. 2018. V. 21. № 3. P. 15–21 (in Russian)].
- *Eija Hyvönen, Pertti Turunen, Erkki Vanhanen et al.* Airborne Gamma-Ray Surveys in Finnland // Aerogeophysics in Finnland 1972-2004: Methods, Systems, Characteristics and Applications, edites by Meri-Liisa Aero. Geological Survey of Finnland, Special Papers 39. 2005. P. 119–134.
- Perrotta M. M., Almedia T.I., Andrade J.B.F. et al. Remote sensing geobotany and airborne gamma-rey date applied to geological mapping within terra firme Brasilian Amason Forest: A comparative study in the Gvapore Valley (Matto Grosso state, Brasil) // The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spation Information Sciences. Vol. XXXVII. Part. P 8. Beijng, 2008. P. 1275–1280.
- Yamaguchi Ya., Kahle A.B., Tsu H. et. al. Overview of Advanced Spacerborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1998. V. 36 (4). P. 1062–1071.

TEMPERATURE, PH INDICATOR AND THE ANOMALIES OF THE NATURAL RADIOACTIVE ELEMENT RATIOS OF METASOMATITES IN PRIAMURYE

T.V. Volodkova

Yu.A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics FEB RAS, Khabarovsk, Russia, 680000

Based on the airborne geophysical data, the anomalies of the natural radioactive element (NRE) ratio values above a background level are determined for different types of metasomatites in Priamurye. Three characteristics of the anomalies of the NRE ratios and the temperature and pH indicator values are related by a differential equation. A solution of the equation is found in partial derivatives. This dependence describes mathematically the regional metasomatism processes and is graphically displayed in ellipses or degenerated hyperbolas. The established regularities are confirmed by the experimental data. It is shown that a set of the characteristic NRE ratios, and the temperature and pH indicator unambiguously, within the limits of permissible errors, define any type of metasomatites in Priamurye. The derived dependence can be used during the airborne geophysical survey for mapping the regional metasomatic systems, and ore nodes and ore fields. The application of such a technique at the initial stages of mineral prognosis allows us to dramatically increase the reliability of the results and localize perspective areas.

Keywords: aerogammaspectrometry, metasomatites in Priamurye, differential equation, ellipse, degenerated hyperbola.

Поступила в редакцию 02.05.2020 г. После доработки 20.11.2020 г. Принята в печать 16.12.2020 г