

Виды метасоматических пород: температурные условия образования, особенности состава, минерагения

Геннадий Петрович ДВОРНИК

Институт геологии и геохимии им. акад. А. Н. Заварицкого УрО РАН, Россия, Екатеринбург

Аннотация

Актуальность работы обусловлена важным практическим значением метасоматических пород, сопровождающих многие рудные и нерудные полезные ископаемые.

Цель работы: исследование температурных условий формирования, особенностей химического и минерального состава, минерагении метасоматитов.

Результаты. Приведена расширенная классификация основных видов метасоматических пород (щелочных, основных, кислотных), сформировавшихся в раннюю щелочную и кислотную стадии гидротермального процесса. Рассмотрены температурные условия образования, особенности вещественного состава, минерагения метасоматитов. Щелочные метасоматиты подразделяются на калиевые (пироксеновые фениты, микроклиниты, биотит-ортоклазовые метасоматиты, гумбеиты) и натриевые (нефелин-пироксеновые фениты, альбититы, эйситы). С калиевыми метасоматитами (гумбеитами) ассоциируют месторождения вольфрама, молибдена, золота и урана, с натриевыми метасоматитами (альбититами) – месторождения бериллия, лития, тантала, ниобия. Основные метасоматические породы (базификаты) включают кальциевые и железо-магнезиальные метасоматиты (известковые и магнезиальные скарны, диопсид-лазуритовые метасоматиты, родингиты, камафориты, карбонатиты, апокарбонатные кальцитовые, доломит-анкеритовые, магнезитовые и сидероплезитовые метасоматиты). Со скарнами связано образование месторождений железа, бора, флогопита, с карбонатитами – месторождений редкоземельных элементов, тантала, ниобия, апатита. Кислотные метасоматиты подразделяются на глиноземистые и кремнеземистые. К глиноземистым метасоматитам относятся пропициты, хлоритолиты, микроклин-серицитовые и турмалин-серицитовые метасоматиты, вторичные кварциты, аргиллизиты. С вторичными кварцитами ассоциируют месторождения глиноземного сырья (каолинов, бентонитов). Кремнеземистые метасоматиты включают наибольшее количество видов: уралитовые метасоматиты, грейзены, листовениты и березиты, хлорит-серицит-кварцевые и серицит-кварцевые метасоматиты, чароититы, серпентиниты, нефриты, антофиллитовые метасоматиты, карбонатно-тальковые метасоматиты и талькиты, магнетитовые кварциты, яшмы, джаспероиды. Среди них выделяется группа метасоматитов, состоящих из кварца в ассоциации с гидроксилсодержащими алюмосиликатами (мусковитом, топазом, хлоритом). В другую группу входят низкоглиноземистые метасоматиты, в минеральном составе которых преобладают гидроксилсодержащие кальциевые и магниевые силикаты (чароит, серпентин, антофиллит, тремолит, тальк). Третья группа представлена метасоматитами существенно кварцевого состава (магнетитовыми кварцитами, яшмами, джаспероидами). С кремнеземистыми метасоматитами связано формирование месторождений железа, олова, вольфрама, молибдена, золота, полиметаллов, нерудного сырья (асбеста, талька, чароита, нефрита, яшмы).

Выводы. По температуре формирования выделены высокотемпературные (выше 500 °С), среднетемпературные (500–300 °С) и низкотемпературные (ниже 300 °С) метасоматические породы. Для средних составов щелочных метасоматитов характерны высокие концентрации оксидов калия или натрия, преобладание полевых шпатов (ортоклаза, микроклина, альбита) в ассоциации с пироксенами, карбонатами. Основные метасоматиты выделяются высокими содержаниями оксидов кальция, магния и железа при низких концентрациях кремнезема, превалированием в минеральном составе силикатов (пироксенов и гранатов) или карбонатов (кальцита, доломита, магнезита, брейнерита). Для состава кислотных метасоматитов характерны высокие концентрации глинозема или кремнезема, преобладание гидроксилсодержащих алюмосиликатов, силикатов и кварца.

Ключевые слова: виды, щелочные, основные и кислотные метасоматиты, условия формирования, состав, минерагения.

Введение

Метасоматические породы в отличие от других по происхождению типов горных пород (магматических, метаморфических, осадочных) представляют особый тип пород, вещественный состав которых зависит как от состава замещаемых ими силикатных и карбонатных пород, так и от состава воздействующих на них гидротермальных растворов [1]. Метасоматиты имеют важное практическое значение, с ними ассоциируют многие рудные и нерудные полезные ископаемые. За последние шестьдесят пять лет накопился обширный фактический материал по химическому и минеральному составу различных видов метасоматических пород, сосредоточенный в многочисленных монографиях и статьях, начиная с известного сборника под редакцией Н. Н. Курека [2].

В соответствии с положениями Петрографического кодекса России [3] по кислотно-щелочным свойствам воздействующих на исходные породы гидротермальных флюидов выделены отряды метасоматитов (щелочные, основные, кислотные), сформировавшихся согласно теории метасоматических процессов [4] в раннюю щелочную и кислотную стадии. Породы каждого отряда по накоплению определенных катионов подразделяются на подотряды калиевых и натриевых метасоматитов в отряде щелочных пород, подотряды кальциевых и железо-магнезиальных метасоматитов в отряде основных пород, подотряды глиноземистых и кремнеземистых метасоматитов в отряде кислотных пород. Подотряды делятся на семейства метасоматических пород по температуре их образования: высокотемпературные (выше 500 °С), среднетемпературные (500–300 °С), низкотемпературные (ниже 300 °С) [5]. Семейства подразделяются на виды метасоматических пород по их химическому и минеральному составу. Приведена расширенная классификация видов метасоматических пород (табл. 1), рассмотрены температурные условия их формирования, особенности химического и минерального состава и минерогения. Фактическим материалом для характеристики состава видов метасоматических пород послужили данные 1240 химических анализов щелочных, основных и кислотных метасоматитов [6, 7 и др.].

Щелочные метасоматиты

Среди щелочных метасоматитов выделяются калиевые и натриевые разновидности. К калиевым щелочным метасоматитам относятся пироксеновые фениты, микроклиниты, биотит-ортоклазовые метасоматиты, гумбеиты (табл. 1). Фениты формируются в контактовых зонах калиевых и калиево-натриевых щелочных массивов с вмещающими алюмосиликатными породами (гранитами, гнейсами, амфиболитами) [8]. Ширина зон фенитизации варьирует в широких пределах – от первых метров до нескольких километров. В контактовых ореолах калиевых щелочных массивов фениты представлены преимущественно пироксен-ортоклазовыми метасоматитами, характеризуются отношением $K_2O/Na_2O > 1$, развитием щелочных пироксенов (эгирина, эгирин-авгита, эгирин-диопсида). А в контактовых зонах калиево-натриевых щелочных массивов фениты выделяются по составу более низким отношением $K_2O/Na_2O < 1$, образованием пироксенов диопсид-геденбергитового ряда и нефелина за счет высокого содержания в эдуктах натрия.

Температурный интервал формирования фенитов по геологическим и экспериментальным данным составляет 500–800 °С, а рН флюида, равновесного с минеральными ассоциациями фенитов, равен 7–10. Микроклиниты получили достаточно широкое распространение в пределах калиевых щелочных вулканоплутонических комплексов. Они развиваются преимущественно по щелочным сиенитам (пуласкитам, сиенит-пегматитам, псевдолейцитовым сиенит-порфирам) и породам вулканогенной кровли (щелочным трахитам, псевдолейцитовым фонолитам) при $T = 550–400$ °С и $P = 100–150$ МПа. Микроклиниты отличаются по составу от других видов калиевых метасоматитов наиболее высокой концентрацией в них оксида калия и глинозема (табл. 2). Микроклиниты рассматриваются как перспективный источник полевошпатового сырья. В менее щелочных условиях формируются по средним и кислым породам (монцитам, диоритам, гранитам) биотит-ортоклазовые метасоматиты, распространенные на многих молибден-медно-порфировых месторождениях [9].

Гумбеиты образуются при $T = 400–250$ °С при повышенной активности калия и углекислого газа в гидротермальных растворах. Химический состав метасоматитов гумбеитовой формации (табл. 2) в значительной степени зависит от состава замещаемых ими пород. Гумбеиты, сформировавшиеся по карбонатным породам (песчанистым, глинистым доломитам), выделяются более высокой концентрацией в их составе CO_2 в сравнении с карбонатно-калишпатовыми метасоматитами, развитыми по алюмосиликатному субстрату (гранитам, диоритам, гнейсам). С метасоматитами гумбеитовой формации связано образование вольфрамового, молибденового и золото-уранового оруденения [10].

Натриевые щелочные метасоматиты представлены нефелин-пироксеновыми фенитами, альбититами и эйситами (табл. 1). Среди них альбититы характеризуются наиболее высоким содержанием в их составе оксида натрия (табл. 2). Они образуются по породам кислого и среднего состава (гранитам, нефелиновым сиенитам) при $T = 500–400$ °С. Второстепенными минералами альбититов являются кварц, биотит, пироксен. С апогранитными альбититами ассоциируют месторождения бериллия, лития, рубидия, с апосиенитовыми альбититами – месторождения тантала, ниобия, церия. Эйситы относятся к низкотемпературным натриевым метасоматитам анкерит-альбитового состава. Они развиваются в обстановке повышенной активности натрия и углекислого газа в гидротермальных флюидах по породам кислого и среднего состава (гранитам, диоритам, песчаникам) [11]. Эйситы являются типичными околорудными метасоматитами урановых месторождений. Рассмотренные виды щелочных метасоматитов характеризуются по среднему составу высокой концентрацией оксидов калия или натрия при содержаниях глинозема 10–19 %, кремнезема 46–65 % (табл. 2), преобладанием минералов полевошпатовой ассоциации (ортоклаза, микроклина, альбита).

Основные метасоматиты

Основные метасоматические породы (базификаты) включают известковые и магнезиальные скарны,

диопсид-лазуритовые метасоматиты, родингиты, камафориты, карбонатиты, апокарбонатные кальцитовые, доломит-анкеритовые, магнезитовые, сидероплезитовые метасоматиты (табл. 1), сформировавшиеся в условиях проявления субщелочного кальциевого и железо-магнезиального метасоматоза. Для средних химических составов основных метасоматитов характерны низкие содержания глинозема (0,3–12 %) и кремнезема (2–45 %) при высокой концентрации оксидов кальция, магния и железа (табл. 3), преобладание в минеральном составе пироксенов и гранатов или карбонатов. Скарны образуются в приконтактовой области интрузий преимущественно кислого и среднего состава (гранитов, диоритов,

сиенитов) с вмещающими карбонатными породами (известняками, доломитами). Известковые скарны формируются при $T = 750\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$, магнезиальные скарны – при $T = 800\text{--}450\text{ }^{\circ}\text{C}$ [12, 13]. Основными минералами известковых скарнов являются пироксены диопсид-геденбергитового ряда и гранаты гроссуляр-андрадитового состава, магнезиальных скарнов – диопсид, флогопит, шпинель. Для известковых скарнов типичны месторождения железа, для магнезиальных скарнов – месторождения бора, флогопита. На контакте алюмосиликатных пород (сиенитов) с доломитовыми мраморами развиваются при $T = 600\text{--}545\text{ }^{\circ}\text{C}$ диопсид-лазуритовые метасоматиты, являющиеся основным источником ювелирно-поделочного лазурита.

Таблица 1. Классификация видов метасоматических пород (по [3] с дополнениями автора).

Table 1. Classification of species of metasomatic rocks (according to [3] with some additions of the author).

Отряд	Подотряд	Семейства	Виды
Щелочные	Калиевые	Высокотемпературные	Пироксеновые фениты
		Высоко-среднетемпературные	Микроклиниты Биотит-ортоклазовые метасоматиты
		Среднетемпературные	Гумбеиты
	Натриевые	Высокотемпературные	Нефелин-пироксеновые фениты
		Среднетемпературные	Альбититы
		Низкотемпературные	Эйситы
Основные	Кальциевые	Высокотемпературные	Известковые скарны Диопсид-лазуритовые метасоматиты
		Среднетемпературные	Родингиты
		Высоко-среднетемпературные	Кальцитовые карбонатиты Апокарбонатные кальцитовые метасоматиты
	Железо-магнезиальные	Высокотемпературные	Магнезиальные скарны
		Среднетемпературные	Камафориты Доломит-анкеритовые карбонатиты Апокарбонатные доломит-анкеритовые метасоматиты
		Низкотемпературные	Магнезитовые метасоматиты Сидероплезитовые метасоматиты
Кислотные	Глиноземистые	Средне-низкотемпературные	Пропилиты Хлоритолиты Микроклин-серицитовые метасоматиты
		Среднетемпературные	Турмалин-серицитовые метасоматиты Вторичные кварциты
		Низкотемпературные	Аргиллизиты
	Кремнеземистые	Высокотемпературные	Уралитовые метасоматиты Чароититы Антофиллитовые метасоматиты
		Среднетемпературные	Грейзены Лиственины Березиты Хлорит-серицит-кварцевые метасоматиты Серпентиниты Нефриты Карбонат-тальковые метасоматиты Талькиты
		Низкотемпературные	Серицит-кварцевые метасоматиты
		Средне-низкотемпературные	Магнетитовые кварциты Яшмы Джаспероиды

К контактово-реакционным (биметасоматическим) образованиям относятся родингиты, формирующиеся по дайкам основного и среднего состава (габбро, долеритам, диоритам) и вмещающим их ультраосновным породам (серпентинитам) при $T = 550-370$ °С. Породообразующими минералами родингитов являются диопсид, гроссуляр и хлорит. В жилообразных телах родингитов установлены месторождение и рудопроявления золота [14].

Камафориты образуют линзовидные и жилообразные тела в щелочно-ультраосновных массивах. Это высокомагнезиальные метасоматические породы (табл. 3), состоящие из форстерита, магнетита и более поздних апатита и кальцита. С камафоритами связаны месторождения железных руд. В интрузивных комплексах ультраосновных и щелочных пород также формируются при $T = 600-300$ °С кальцитовые и доломит-анкеритовые карбонатиты. В карбонатитовых месторождениях сосредоточены ресурсы тантала, ниобия, редкоземельных элементов, железа, апатита. Апокарбонатные кальцитовые и доломит-анкеритовые метасоматиты являются характерными околорудными гидротермальными породами золоторудных, полиметаллических и ртутно-сурьмяных джаспероидных месторождений. В карбонатных породах месторождений (доломитах, известняках) при $T = 620-430$ °С образовались кальцитовые метасоматиты, при $T = 380-340$ °С – более поздние доломит-анкеритовые метасоматиты. В более низкотемпературных условиях (330–250 °С) происходило формирование аподоломитовых железо-магнезиальных метасоматитов, вмещающих залежи магнетита и сидерита [15].

Кислотные метасоматиты

Метасоматиты стадии кислотного выщелачивания подразделяются на глиноземистые и кремнеземистые. К глиноземистым метасоматитам относятся пропилиты, хлоритолиты, микроклин-серицитовые и турмалин-серицитовые метасоматиты, вторичные кварциты,

аргиллизиты (табл. 1). Средние составы глиноземистых метасоматитов характеризуются высокими концентрациями Al_2O_3 (16–28 %) при содержаниях SiO_2 38–73 % (табл. 4), преобладанием гидроксилсодержащих алюмосиликатов (эпидотов, хлоритов, серицитов, пиррофиллитов, каолинитов, монтмориллонитов) или алюмосульфатов (алунитов). Пропилиты формируются при $T = 350-200$ °С по интрузивным и эффузивным породам основного и среднего состава [16, 17]. Основными минералами пропилитов являются эпидот, хлорит и альбит. Дорудная пропилитизация имеет широкое распространение на многих медноколчеданных, молибден-медно-порфировых месторождениях. Пропилиты преимущественно эпидотового состава нередко развиваются по известковым пироксен-гранатовым скарнам. Хлоритолиты замещают вулканогенные породы среднего и основного состава (андезиты, базальты) на медноколчеданных и колчеданно-полиметаллических месторождениях. Микроклин-серицитовые метасоматиты образуют в калиевых щелочных вулканоплутонических комплексах штокообразные тела площадью от сотых долей до десятков квадратных километров. Они формируются по щелочным сиенитам, псевдолейцитовым порфирам при $T = 400-150$ °С и $P = 300-50$ МПа. От других видов глиноземистых метасоматитов микроклин-серицитовые метасоматиты отличаются по среднему составу наиболее высокими концентрациями глинозема и оксида калия (табл. 4). В калиевых щелочных массивах они вмещают зоны поздних мелкозернистых микроклинитов с золото-порфировым оруденением. Микроклин-серицитовые метасоматиты также являются перспективным источником глиноземного сырья. Своеобразные метасоматические породы турмалин-серицитового состава с рутилом и гематитом, сопоставимые по среднему содержанию глинозема с микроклин-серицитовыми метасоматитами (табл. 4), образуются при $T = 500-350$ °С

Таблица 2. Средний химический состав щелочных метасоматитов, мас. %.
Table 2. Average chemical composition of alkaline metasomatites, wt.%.

Компоненты	Метасоматиты							
	1(20)	2(25)	3(20)	4(20)	5(41)	6(22)	7(27)	8(25)
SiO ₂	56,60	59,82	65,31	60,49	45,57	57,83	65,16	53,76
TiO ₂	0,89	0,35	0,32	0,44	0,51	0,66	0,27	0,60
Al ₂ O ₃	15,17	18,71	16,45	13,43	10,40	18,33	18,38	13,70
Fe ₂ O ₃	4,54	2,09	1,70	3,14	5,12	2,68	1,28	1,38
FeO	2,59	0,90	0,96	1,01	0,44	2,46	1,05	2,64
MnO	0,11	0,08	0,04	0,05	0,12	0,32	0,05	0,12
MgO	2,05	0,45	0,82	1,36	4,58	1,23	0,80	3,23
CaO	3,85	0,74	1,10	3,67	11,33	2,31	1,34	6,62
Na ₂ O	3,66	1,23	4,54	1,07	0,12	7,19	8,99	6,62
K ₂ O	9,33	13,71	9,44	8,91	7,13	5,40	0,88	0,73
P ₂ O ₅	0,20	0,07	0,12	0,24	0,21	0,29	0,17	0,18
H ₂ O	0,94	1,00	1,02	0,62	0,60	0,83	0,35	0,48
CO ₂	0,41	0,50	0,53	4,29	12,75	0,14	0,32	9,31
Сумма	100,34	99,65	99,52	100,31	98,88	99,67	99,07	99,37

Примечание. 1–5 – калиевые метасоматиты: 1 – пироксеновые фениты; 2 – микроклиниты; 3 – биотит-ортоклазовые метасоматиты; 4–5 – гумбеиты по алюмосиликатным и карбонатным породам; 6–8 – натриевые метасоматиты (6 – нефелин-пироксеновые фениты, 7 – альбититы, 8 – зйситы). В скобках здесь и в табл. 3, 4 приведено количество анализов пород.

по кварцитопесчаникам с прослоями алевропелитов на месторождениях жильного кварца и горного хрусталя [18]. На участках раствороподводящих структур в турмалин-серицитовых метасоматитах отмечаются включения сульфидов (пирита, халькопирита, галенита), самородных элементов (золота, аурикуприда).

Вторичные кварциты развиваются по эффузивным и интрузивным породам кислого и среднего состава при $T = 500-250$ °C. Типоморфными минералами вторичных кварцитов являются кварц и высокоглиноземистые минералы – серицит, пиррофиллит, алуниит. С массивами вторичных кварцитов связаны месторождения глиноземного сырья (диаспора, корунда, пиррофиллита, алуниита). Аргиллизиты представлены метасоматитами кварц-каолинитового и кварц-монтмориллонитового состава, образующимися в более низкотемпературных условиях (250–100 °C). Метасоматиты аргиллизитовой формации проявлены на месторождениях нерудного сырья (каолинов, бентонитов), а также на урановых, золото-серебряных и ртутно-сурьмяных месторождениях.

Кремнеземистые метасоматиты включают наибольшее количество видов: уралитовые метасоматиты, грейзены, листвениты и березиты, хлорит-серицит-кварцевые и серицит-кварцевые метасоматиты, чароититы, серпентиниты, нефриты, антофиллитовые метасоматиты, карбонатно-тальковые метасоматиты и талькиты, магнетитовые кварциты, яшмы, джаспероиды (табл. 1). Среди них выделяется группа метасоматитов с повышенными средними содержаниями глинозема (12–14 %) и концентрациями кремнезема (37–75 %) (табл. 4), состоящими из кварца в ассоциации с гидроксилсодержащими алюмосиликатами (мусковитом, топазом, хлоритом, серицитом). В другую группу входят низкоглиноземистые метасоматиты ($Al_2O_3 - 0,4-2$ %), в минеральном составе которых преобладают гидроксилсодержащие кальциевые и магни-

евые силикаты (чароит, серпентин, антофиллит, тремолит, тальк). Третью группу составляют метасоматические породы существенно кварцевого состава (магнетитовые кварциты, яшмы, джаспероиды).

Особое положение среди кремнеземистых метасоматитов занимают уралитовые метасоматиты, развивающиеся по ультраосновным и основным породам (дунитам, пироксенитам, габбро) в высокотемпературных условиях (800–650 °C). С уралитовыми (роговообманковыми) метасоматитами связано формирование месторождений титаномагнетитовых руд [19]. Грейзены образуются при $T = 500-300$ °C в апикальных частях гранитных массивов и алюмосиликатных породах их кровли (песчаниках, сланцах, эффузивах). Основными минералами апогранитных грейзенов являются кварц, мусковит, топаз. Мусковит-кварцевые, топаз-кварцевые и кварцевые грейзены распространены на месторождениях редких металлов (олова, вольфрама, молибдена, бериллия). Метасоматиты березит-лиственитовой формации формируются при $T = 380-250$ °C в результате воздействия на исходные породы углекисловодных растворов [20]. Химический и минеральный состав метасоматитов этой формации отчетливо коррелируется с составом эдуктов. Так, в апогранитных березитах карбонат представлен доломит-анкеритом, в апобазитовых лиственитах – брейнеритом, а в лиственитах, развитых по ультраосновным породам (серпентинитам), – магнезитом. С метасоматитами березит-лиственитовой формации генетически связаны многие рудные месторождения золота, полиметаллов, урана. Хлорит-серицит-кварцевые метасоматиты являются характерными околорудными породами колчеданных месторождений меди, цинка, свинца. Они образуются по вулканогенным породам риолит-базальтовой формации при $T = 420-280$ °C. Серицит-кварцевые метасоматиты, распространенные на молибден-медно-порфировых месторождениях, формируются при $T = 310-210$ °C по

Таблица 3. Средний химический состав основных метасоматитов, мас. %.
Table 3. The average chemical composition of the main metasomatites, wt%.

Компоненты	Метасоматиты												
	1(27)	2(37)	3(23)	4(22)	5(22)	6(28)	7(20)	8(20)	9(29)	10(22)	11(20)	12(31)	13(22)
SiO ₂	40,12	40,63	44,15	42,53	6,82	1,76	45,27	42,81	10,99	6,99	6,83	1,84	3,84
TiO ₂	0,19	0,50	0,10	0,60	0,34	0,02	0,28	0,25	0,89	0,99	0,04	0,02	0,03
Al ₂ O ₃	6,87	11,47	11,70	12,25	1,52	0,30	8,99	11,66	3,07	1,59	0,62	0,83	1,54
Fe ₂ O ₃	7,66	8,54	0,79	3,08	2,23	0,22	2,42	3,38	33,86	4,61	4,47	0,63	1,96
FeO	3,76	4,06	0,44	4,79	2,96	0,10	0,71	2,52	12,62	4,43	0,25	1,17	39,57
MnO	1,94	0,55	0,03	0,17	0,39	0,06	0,10	0,07	0,28	1,18	1,20	0,05	1,22
MgO	4,70	3,23	10,69	9,33	2,18	1,60	19,91	17,13	17,04	13,56	16,41	44,21	12,49
CaO	28,66	27,56	18,18	23,63	45,47	52,45	17,74	15,48	10,52	29,39	28,34	1,64	1,51
Na ₂ O	0,42	0,38	4,98	0,54	0,62	0,07	0,25	0,89	0,15	0,61	0,09	0,08	0,01
K ₂ O	0,10	0,32	1,01	0,08	0,65	0,10	0,08	2,82	0,31	0,52	0,33	0,07	0,01
P ₂ O ₅	0,10	0,09	0,48	0,17	2,20	0,03	0,06	0,02	5,71	1,84	0,02	0,03	0,01
H ₂ O	0,37	0,87	2,39	3,02	0,76	0,43	2,24	2,47	1,13	0,60	0,97	0,07	0,01
CO ₂	4,06	0,34	2,48	0,56	33,59	42,51	1,22	0,69	4,58	32,02	39,68	48,97	37,58
Сумма	98,95	98,54	100,64	100,75	99,73	99,65	99,27	100,19	101,15	98,33	99,25	99,61	99,77

Примечание. 1–6 – кальциевые метасоматиты: 1–2 – известковые экзоскарны (1) и эндоскарны (2), 3 – диоксид-лазуриновые метасоматиты (SO₃ – 3,21 %), 4 – родингиты по основным породам, 5 – кальцитовые карбонаты, 6 – апокарбонатные кальцитовые метасоматиты; 7–13 – железо-магнезиальные метасоматиты: 7–8 – магнезиальные экзоскарны (7) и эндоскарны (8), 9 – камафориты, 10 – доломит-анкеритовые карбонаты, 11 – апокарбонатные доломит-анкеритовые метасоматиты, 12 – магнезитовые метасоматиты, 13 – сидероплезитовые метасоматиты.

Таблица 4. Средний химический состав кислотных метасоматитов, мас. %.
Table 4. Average chemical composition of acid metasomatites, wt%.

Компоненты	Метасоматиты									
	1(20)	2(33)	3(20)	4(23)	5(20)	6(23)	7(21)	8(20)	9(24)	10(23)
SiO ₂	54,56	33,19	53,20	39,80	73,42	73,62	38,45	64,48	59,80	38,99
TiO ₂	0,75	1,06	0,14	6,93	0,39	0,59	0,44	0,50	0,61	1,54
Al ₂ O ₃	16,63	16,97	28,19	28,05	16,35	17,36	21,82	19,30	21,09	13,25
Fe ₂ O ₃	4,80	6,20	1,43	9,60	1,33	2,95	4,54	1,44	3,74	6,43
FeO	2,49	13,75	0,32	0,22	0,37	0,63	0,02	1,23	0,43	8,80
MnO	0,12	0,24	0,03	0,01	0,05	0,03	0,01	0,06	0,05	0,14
MgO	3,08	15,51	0,21	0,97	0,71	0,14	0,11	0,87	2,14	13,01
CaO	7,94	2,36	0,29	0,46	0,34	0,25	0,20	1,45	1,26	12,57
Na ₂ O	2,46	0,35	0,41	0,62	0,30	0,18	1,71	1,14	1,13	1,83
K ₂ O	2,34	0,13	12,28	8,36	2,02	0,31	3,83	2,97	0,62	0,53
P ₂ O ₅	0,16	0,20	0,05	0,11	0,06	0,08	0,17	0,20	0,37	0,33
H ₂ O	2,45	8,16	2,50	3,89	4,28	3,64	7,60	4,93	8,19	2,30
CO ₂	1,07	0,80	0,14	0,01	0,01	0,01	0,01	1,68	0,89	0,09
Сумма	98,85	98,92	99,49	99,03	99,63	99,79	100,41	100,25	100,32	99,81
Компоненты	11 (37)	12 (38)	13 (29)	14(24)	15(20)	16(20)	17 (20)	18 (28)	19 (29)	20 (22)
SiO ₂	75,54	81,50	29,93	37,51	65,40	71,21	69,73	57,59	36,51	56,04
TiO ₂	0,21	0,10	0,04	0,95	0,50	0,42	0,41	0,36	0,05	0,05
Al ₂ O ₃	12,96	12,30	1,32	13,97	14,34	12,16	14,12	2,18	1,11	1,39
Fe ₂ O ₃	1,42	0,60	1,28	1,70	1,94	2,94	1,64	2,15	5,08	3,40
FeO	1,74	0,60	4,73	6,40	1,82	1,68	2,36	0,40	3,47	4,21
MnO	0,08	0,02	0,16	0,20	0,15	0,04	0,03	0,20	0,13	0,15
MgO	0,66	0,30	25,62	5,89	1,28	3,33	1,00	1,04	40,85	29,35
CaO	0,68	0,90	3,68	10,17	2,64	1,16	1,31	17,13	0,46	0,49
Na ₂ O	0,62	0,40	0,05	0,98	0,89	0,42	1,51	2,96	0,19	0,08
K ₂ O	3,58	0,40	0,31	3,15	4,52	2,44	4,40	7,82	0,07	0,08
P ₂ O ₅	0,08	0,01	0,02	0,16	0,13	0,08	0,12	0,29	0,02	0,06
H ₂ O	1,45	2,70	1,02	2,09	2,09	2,98	2,07	4,87	11,94	3,68
CO ₂	0,16	0,01	31,02	16,60	3,52	0,21	1,04	0,60	0,35	1,16
Сумма	99,18	99,82	99,18	99,77	99,22	99,07	99,74	97,69	99,51	100,14
Компоненты	21(22)	22 (29)	23(20)	24(20)	25(20)	26(20)	27 (37)	28 (35)	29 (20)	
SiO ₂	56,16	34,52	32,62	57,22	59,15	55,55	88,26	90,74	83,22	
TiO ₂	0,05	0,02	0,05	0,12	0,22	0,25	0,09	0,05	0,14	
Al ₂ O ₃	1,21	0,76	0,51	2,12	0,41	1,55	3,27	1,18	3,37	
Fe ₂ O ₃	1,17	2,25	0,69	2,79	0,49	27,07	2,74	0,84	1,79	
FeO	3,33	3,98	0,70	3,30	0,13	11,59	0,74	0,88	1,91	
MnO	0,15	0,11	0,50	0,07	0,02	0,46	0,78	0,04	0,14	
MgO	22,23	32,33	20,90	28,19	31,54	1,47	0,82	1,03	1,14	
CaO	12,63	1,56	20,07	0,99	1,62	0,86	2,94	2,19	2,84	
Na ₂ O	0,13	0,06	0,14	0,18	0,27	0,18	0,17	0,12	0,35	
K ₂ O	0,07	0,06	0,22	0,14	0,27	0,11	0,24	0,34	1,49	
P ₂ O ₅	0,06	0,14	0,02	0,03	0,10	0,34	0,05	0,06	0,10	
H ₂ O	2,31	3,51	2,21	4,60	4,71	0,35	0,36	0,54	0,80	
CO ₂	0,56	20,23	21,67	0,67	2,09	0,13	0,01	2,11	2,33	
Сумма	100,06	99,53	100,30	99,75	101,01	99,91	100,47	100,12	99,62	

Примечание. 1–9 – глинозёмистые метасоматиты: 1 – пропилиты, 2 – хлоритолиты, 3 – микроклин-серицитовые метасоматиты, 4 – турмалин-серицитовые метасоматиты, 5–7 – вторичные кварциты серицит-пирофиллитовые (5), кварц-пирофиллитовые (6) и кварц-алузитовые (7) (SO₃ – 18,8 %); 8, 9 – аргиллизиты кварц-каолиновые (8) и кварц-монтмориллонитовые (9); 10–29 – кремнезёмистые метасоматиты: 10 – уралитовые метасоматиты, 11, 12 – грейзены мусковит-кварцевые (11) и топаз-кварцевые (12), 13, 14 – листвениты по ультраосновным (13) и основным (14) породам, 15 – березиты, 16 – хлорит-серицит-кварцевые метасоматиты, 17 – серицит-кварцевые метасоматиты, 18 – чароититы, 19 – серпентиниты, 20 – антофиллитовые метасоматиты, 21 – нефриты, 22, 23 – апосерпентинитовые (22) и аподоломитовые (23) карбонатно-тальковые метасоматиты, 24, 25 – апосерпентинитовые (24) и аподоломитовые (25) талькиты, 26 – магнетитовые кварциты, 27 – яшмы, 28, 29 – джаспероиды по карбонатным (28) и алюмосиликатным (29) породам.

интрузивным породам кислого и среднего состава (гранитам, диоритам, монцонитам) [21, 22].

Коренные и россыпные проявления чароитового сырья установлены среди фенитов экзоконтактового ореола Мурунского щелочного комплекса. В минеральном составе чароитовых пород (чароитов) определено около 30 минералов. Среди них породообразующими минералами, помимо чароита, являются кварц, пироксен (эгирин-диопсид), микроклин. По данным исследований первичных флюидных включений, в кварце чароититы образовались при $T = 635\text{--}565$ °C, $P = 400\text{--}65$ МПа. Серпентиниты развиваются по породам ультраосновного состава (дунитам, гарцбургитам) при $T = 370\text{--}300$ °C. С процессом серпентинизации гипербазитов связано формирование месторождений хризотил-асбеста. В более высокотемпературных условиях ($670\text{--}600$ °C) происходило образование в массивах серпентинизированных ультрабазитов антофиллитовых метасоматитов, вмещающих залежи антофиллит-асбеста. В другой обстановке в условиях проявления биметасоматического процесса на контактах апогипербазитовых серпентинитов с алюмосиликатными породами (габбро, гранитами) формируются при $T = 400\text{--}370$ °C жилы ювелирно-поделочного нефрита, состоящего преимущественно из скрытокристаллического агрегата амфибола актинолит-тремолитового ряда. Аподолмитовые и апосерпентинитовые карбонатно-тальковые метасоматиты и талькиты (табл. 4) образуются при $T = 500\text{--}350$ °C в результате воздействия на исходные породы гидротермальных растворов кремнекислого или углекислого состава.

Магнетитовые кварциты развиваются при $T = 500\text{--}150$ °C по основным породам (ортопироксенитам, амфиболитам, зеленым сланцам) [23]. Они образуют в пределах гнейсово-мигматитовых комплексов железорудные залежи пластовой, линзовидной и жилообразной формы. Месторождения поделочных и технических яшм гидротермально-метасоматического происхождения размещаются преимущественно в породах риолит-базальтовой формации, реже среди габбро-долеритов. Яшмы формируются при $T = 360\text{--}250$ °C. Породообразующими

минералами яшм являются кварц, гранат, эпидот, гематит. Джаспероиды развиваются по карбонатным породам (доломитам, известнякам, мергелям) и контактирующим с ними алюмосиликатным породам (песчаникам, сланцам, магнезиальным скарнам) при $T = 450\text{--}200$ °C [24, 25]. Джаспероиды тремолит-кварцевого, тальк-кварцевого и адуляр-кварцевого состава образуют метасоматические залежи и жилы плитообразной и линзовидной формы на золоторудных, полиметаллических и ртутно-сурьмяных месторождениях.

Заключение

В соответствии с положениями Петрографического кодекса России приведена расширенная классификация основных видов метасоматических пород (щелочных, основных, кислотных), сформировавшихся в раннюю щелочную и кислотную стадии гидротермального процесса, по температуре их образования, химическому и минеральному составу. По температурным условиям формирования метасоматические породы подразделяются на высокотемпературные (выше 500 °C), среднетемпературные (500–300 °C) и низкотемпературные (ниже 300 °C). Щелочные метасоматиты характеризуются высокой концентрацией в их составе оксидов калия или натрия, преобладанием в минеральном составе полевых шпатов (ортотлаза, микроклина, альбита) в ассоциации с пироксенами, карбонатами. Среди основных метасоматических пород (базификатов) выделены кальциевые и железо-магнезиальные метасоматиты, в состав которых входят силикаты (пироксены и гранаты), или карбонаты (кальцит, доломит, магнезит, сидероплезит). Кислотные метасоматиты делятся на глиноземистые и кремнеземистые метасоматиты, состоящие из гидроксилсодержащих алюмосиликатов (эпидотов, хлоритов, серицитов, пиррофиллитов, каолинитов, монтмориллонитов) и силикатов (чароита, серпентина, антофиллита, тремолита, талька) и кварца. В минерогеническом аспекте рассмотренные виды метасоматических пород имеют важное практическое значение, с ними связано образование многих месторождений рудных и нерудных полезных ископаемых.

Исследования выполнены в рамках государственного задания (номер госрегистрации АААА-А18-118052590028-9).

ЛИТЕРАТУРА

1. Метасоматизм и метасоматические породы / под ред. В. А. Жарикова и В. Л. Русинова. М.: Научный мир, 1998. 492 с.
2. Измененные околорудные породы и их поисковое значение / под ред. Н. Н. Курика. М.: Госгеолтехиздат, 1954. 272 с.
3. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2008. 200 с.
4. Коржинский Д. С. Теория метасоматической зональности. М.: Наука, 1982. 104 с.
5. Зарайский Г. П. Зональность и условия образования метасоматических пород. М.: Недра, 1989. 324 с.
6. Дворник Г. П. Метасоматизм и золотое оруденение калиевых щелочных массивов (на примере Центрально-Алданской щелочной провинции). Екатеринбург: УГГУ, 2014. 329 с.
7. Дворник Г. П. Оценка характера связи метасоматических пород и их эдуктов по кислотно-основным свойствам // Изв. УГГУ. 2017. Вып. 2(46). С. 53–56. doi:10.21440/2307-2091-2017-2-53-56
8. Бардина Н. Ю., Попов В. С. Фениты: систематика, условия формирования и значение для корового магмообразования // Записки ВМО. 1994. Ч. 123, № 6. С. 1–19.
9. Жуков Н. М. Инфильтрационный метасоматизм и природные колонны гидротермалитов. Алма-Ата, 1991. 216 с.
10. Бойцов В. Е., Пилипенко Г. Н., Солодов Н. А. Месторождения благородных, радиоактивных и редких металлов / под ред. Л. В. Оганесяна. М.: НИИ-Природа, 1999. 220 с.
11. Щербань И. П., Цой Р. В., Иванов И. П. Околорудные метасоматиты Западного Узбекистана. М.: Наука, 1990. 189 с.
12. Плющев Е. В., Шатов В. В., Кашин С. В. Металлогения гидротермально-метасоматических образований // Труды ВСЕГЕИ. Новая серия. 2012. Т. 354. 560 с.
13. Коржинский Д. С. Петрология скарновых месторождений // Избр. труды. М.: Наука, 1993. 286 с.
14. Мурзин В. В., Варламов Д. А., Ронкин Ю. Л., Шанина С. Н. Происхождение золотоносных рудинитов Карабашского массива альпийских гипербазитов на Южном Урале // Геология рудных месторождений. 2013. Т. 55(4). С. 320–341. doi: 10.7868/S0016777013040059

15. Маслов А. В., Крупенин М. Т., Гареев Э. З., Анфимов Л. В. Рифей западного склона Южного Урала (классические разрезы, седименто- и литогенез, минерагения, геологические памятники природы). Екатеринбург: УрО РАН, 2001. Т. 1. 351 с.
16. Русинов В. Л. Геологические и физико-химические закономерности пропилитизации. М.: Наука, 1972. 204 с.
17. Muller D., Groves D. I. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization // Mineral Resource Reviews. Heidelberg: Springer-Verlag, 2016. 311 p. <https://doi.org/10.1007/978>
18. Репина С. А. Месторождение жильного кварца и горного хрусталя Желанное. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. 287 с.
19. Грязнов О. Н. Рудоносные метасоматические формации складчатых поясов. М.: Недра, 1992. 256 с.
20. Сазонов В. Н. Березит-лиственитовая формация и сопутствующее ей оруденение. Свердловск: УрО АН СССР, 1984. 208 с.
21. Кривцов А. И., Мигачев И. Ф., Попов В. С. Медно-порфиновые месторождения мира. М.: Недра, 1986. 236 с.
22. Sillitoe R. N. Porphyry copper systems // Econ. Geol., 2010. Vol. 105, № 1. P. 3–41. <https://doi.org/10.3103/S014587521705009X>
23. Панков Ю. Д. Формации метасоматических железистых кварцитов. М.: Наука, 1984. 201 с.
24. Урюмов А. Н. Джаспероидные месторождения золота (геология, условия размещения и формирования): дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.11. Екатеринбург: УГИ, 1993. 620 с.
25. Berger V. I., Mosier D. L., Bliss Y. D., Moring B. C. Sediment-hosted gold deposits of the world-database and grade and tonnage models: U. S. Geological Survey Open-File Report. 2014. 46 p. <https://doi.org/10.3133/ofr20141074>

Статья поступила в редакцию 19 сентября 2019 года

Types of metasomatic rocks: temperature conditions, buildups, features of composition, minerageny

Gennadiy Petrovich DVORNIK

The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of RAS, Ekaterinburg, Russia

Annotation

The relevance of the work is due to the importance of metasomatic rocks associated many ore and non-metallic mineral resources.

Purpose of the work: study of temperature conditions of formation, the characteristics of the chemical and mineral composition, the mineralogy of metasomatites.

Results. The extended classification of the main types of metasomatic rocks (alkaline, basic, acidic) formed in the early alkaline and acid stages of the hydrothermal process is given. Temperature conditions of formation, features of chemical and mineral composition and metasomatite mineralogeny are considered. Alkaline metasomatites are subdivided into potassium (pyroxene phenites, microclinites, biotite-orthoclase metasomatites, gumbaites) and sodium (nepheline-pyroxene phenites, albites, sodic alterations). Deposits of tungsten, molybdenum, gold and uranium are associated with potassium metasomatites (gumbaites), and deposits of beryllium, lithium, tantalum, and niobium are associated with sodium metasomatites (albite). The main metasomatic rocks (basificates) include calcium and iron-magnesian metasomatites (calcareous and magnesian skarns, diopside-lapis lazuli metasomatites, rhodinites, kamaforites, carbonatites, apocarbonate calcites, dolomite-ankerite, magnesite and sideroplesite metasomatites). The formation of deposits of iron, boron, and phlogopite is associated with skarn; deposits of rare-earth elements, tantalum, niobium, and apatite are associated with carbonatites. Acid metasomatites are subdivided into aluminous and siliceous. Aluminous metasomatites include propylites, chloritolites, microcline-sericite and tourmaline-sericite metasomatites, secondary quartzites, argillized rocks. Alumina deposits (kaolins, bentonites) are associated with secondary quartzites. Siliceous metasomatites include the largest number of species: uralite metasomatites, greisens, listvenites and berezites, chlorite-sericite-quartz and sericite-quartz metasomatites, charoitites, serpentinites, nephrites, anthophyllite metasomatites, carbonate-talc metasomatites and talcites, magnetite quartzites, jaspers, jasperoids. There is a group of metasomatites among them consisting of quartz in association with hydrous aluminosilicates (muscovite, topaz, and chlorite). The other group includes low-alumina metasomatites, the mineral composition of which is dominated by hydrous calcium and magnesian silicates (charoite, serpentine, antophyllite, tremolite, talc). The third group is represented by metasomatites of quartz composition (magnetite quartzites, jaspers, jasperoids). The formation of deposits of iron, tin, tungsten, molybdenum, gold, polymetals, nonmetallic raw materials (asbestos, talc, charoite, nephrite, jasper) is associated with siliceous metasomatites.

Conclusions. According to the formation temperature, high-temperature (above 500°C), medium-temperature (500–300°C) and low-temperature (below 300°C) metasomatic rocks are distinguished. The average compositions of alkaline metasomatites are characterized by high concentrations of potassium or sodium oxides, the predominance of feldspars (orthoclase, microcline, albite) in association with pyroxenes, carbonates. The main metasomatites are distinguished by high contents of calcium, magnesium and iron oxides at low silica concentrations prevailing in the mineral composition of silicates (pyroxenes and garnets) or carbonates (calcite, dolomite, magnesite, breunnerite). The composition of acid metasomatites is characterized by high concentrations of alumina or silica, the predominance of hydrous aluminosilicates, silicates and quartz.


Keywords: species, alkaline, basic and acid metasomatites, conditions of formation, composition, minerageny.

The studies were carried out within the framework of the state assignment (state registration number AAA18-118052590028-9).

REFERENCES

- 1998, *Metasomatizm i metasomaticheskiye porody* [Metasomatism and metasomatic rocks]. Ed. by V. A. Zharikov and V. L. Rusinov. Moscow: 492 p.
- 1954, *Izmenennyye okolorudnyye porody i ikh poiskovoye znacheniyе* [Modified wallrocks and their prospecting value]. Ed. by N. N. Kureka. Moscow: 272 p.
- 2008, Petrographic Code of Russia. Magmatic, metamorphic, metasomatic, impact formations. Saint-Petersburg, 200 p.
- Korzhinsky D. S. 1982, *Teoriya metasomaticheskoy zonal'nosti* [Theory of metasomatic zonality]. Moscow: 104 p.
- Zaraysky G. C. 1989, *Zonal'nost' i usloviya obrazovaniya metasomaticheskikh porod* [Zonality and conditions of formation of metasomatic rocks]. Moscow, 324 p.

✉ gpdvornik@yandex.ru

 ORCID ID 0000-0001-9013-2223

6. Dvornik G. P. 2014, *Metasomatizm i zolotoye orudneniye kaliyevykh shchelochnykh massivov (na primere Tsentral'no-Aldanskoj shchelochnoy provintsii)* [Metasomatism and gold mineralization of potassium alkaline massifs (using the Central Aldan alkaline province as an example)]. Ekaterinburg, 329 p.
7. Dvornik G. P. 2017, Assessment of the type of bonds between metasomatic rocks and their educts by acid-base properties. *Izvestiya UGGU* [News of the Ural State Mining University], issue 2 (46). pp. 53–56. (In Russ.) doi [10.21440/2307-2091-2017-2-53-56](https://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-2-53-56)
8. Bardina N. Yu., Popov V. C. 1994, Fenites: taxonomy, formation conditions, and significance for core magma formation. *Zapiski RMO* (Proceedings of the Russian Mineralogical Society), p. 123, No 6. pp. 1–19. (In Russ.)
9. Zhukov N. M. 1991, *Infil'tratsionnyy metasomatizm i prirodnyye kolonny gidrotermal'itov* [Infiltration metasomatism and natural columns of hydrothermalite]. Alma-Ata, 216 p.
10. Boytsov V. E., Pilipenko G. N., Solodov N. A. 1999, *Mestorozhdeniya blagorodnykh, radioaktivnykh i redkikh metallov* [Deposits of noble, radioactive and rare metals], ed. by L. V. Oganessian. Moscow: 220 p.
11. Shcherban I. P., Tsoy R. V., Ivanov I. P. 1990, *Okolorudnyye metasomatity Zapadnogo Uzbekistana* [Wallrock metasomatites of Western Uzbekistan]. Moscow: 189 p.
12. Plyushchev E. V., Shatov V. V., Kashin S. V. 2012, *Metallogeniya gidrotermal'no-metasomaticheskikh obrazovaniy* [Metallogeny of hydrothermal-metasomatic formations], Proceeding of A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI), vol. 354. 560 p.
13. Korzhinsky D. S. 1993, *Petrologiya skarnovykh mestorozhdeniy* [Petrology of skarn deposits]. Selectas. Moscow: 286 p.
14. Murzin V. V., Varlamov D. A., Ronkin Yu. L., Shanina S. N. 2013, Origin of gold-bearing rodingites of the Karabash massif of alpinotype hyperbasites in the Southern Urals. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of Ore Deposits], Vol. 55 (4). pp. 320–341. (In Russ.) doi: [10.7868/S0016777013040059](https://doi.org/10.7868/S0016777013040059)
15. Maslov A. V., Krupenin M. T., Gareev E. Z., Anfimov L. V. 2001, *Rifey zapadnogo sklona Yuzhnogo Urala (klassicheskiye razrezy, sedimento-litogenez, minerageniya, geologicheskiye pamyatniki prirody)* [Riphean of the western slope of the Southern Urals (classical sections, sediment genesis and lithogenesis, mineralogy, geological monuments of nature)]. Yekaterinburg, vol. 1. 351 p.
16. Rusinov V. L. 1972, *Geologicheskiye i fiziko-khimicheskiye zakonomernosti propylitizatsii* [Geological and physico-chemical patterns of propylitization]. Moscow: 204 p.
17. Muller D., Groves D. I. 2016, Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization. *Mineral Resource Reviews*. Heidelberg: Springer-Verlag, 311 p. <https://doi.org/10.1007/978>
18. Repina S. A. 2016, *Mestorozhdeniye zhil'nogo kvartsa i gornogo khrustalya Zhelannoye* [Zhelannoe deposit of vein quartz and clear quartz], Yekaterinburg, 287 p.
19. Gryaznov O. N. 1992, *Rudonosnyye metasomaticheskiye formatsii skladchatykh poyasov* [Ore metasomatic formations of folded belts]. Moscow: 256 p.
20. Sazonov V. N. 1984, *Berezit-listvenitovaya formatsiya i soputstvuyushcheye yey orudneniye* [Berezite-listvenite formation and associated mineralization]. Sverdlovsk, 208 p.
21. Krivtsov A. I., Migachev I. F., Popov V. S. 1986, *Medno-porfirovyye mestorozhdeniya mira* [Porphyry copper deposits of the world], Moscow: 236 p.
22. Sillitoe R. N. 2010, Porphyry copper systems. *Econ. Geol.* Vol. 105, No 1. P. 3–41. <https://doi.org/10.3103/S014587521705009X>
23. Pankov Yu. D. 1984, *Formatsii metasomaticheskikh zhelezistykh kvartsitov* [Formations of metasomatic banded iron formations], Moscow: 201 p.
24. Ugryumov A. N. 1993, *Dzhasperoidnyye mestorozhdeniya zolota (geologiya, usloviya razmeshcheniya i formirovaniya)* [Jasperoid gold deposits (geology, conditions of placement and formation)], PhD thesis, 25.00.11. Yekaterinburg, 620 p.
25. Berger V. I., Mosier D. L., Bliss Y. D., Moring B. C. 2014, Sediment-hosted gold deposits of the world-database and grade and tonnage models: U. S. Geological Survey Open-File Report. v46 p. <https://doi.org/10.3133/ofr20141074>

The article was received on September 19, 2019