

Э.М. Спиридонов

Минералогенез
при послемагматических
процессах.

01. Обзор
метасоматитов

Обзор метасоматитов

Будем изучать геохимию рудообразующих процессов - миграцию химических элементов через эволюцию минералов. Физико-химические основы процессов метасоматоза будем рассматривать в небольшой степени, поскольку эти вопросы Вы уже прошли в курсе физической геохимии. Тем, кто считает свою подготовку по физической химии недостаточной, рекомендую курс «Метасоматиты» кафедры петрологии.

Термин «метасоматоз» введён в середине XIX века Карлом Науманном для обозначения псевдоморфного замещения одних минералов другими. **Метасоматоз – процесс взаимодействия горных пород и флюидов, приводящий к изменению химического и минерального состава при сохранении твёрдого состояния горных пород, т.е. с сохранением объёма (закон Вальтера Линдгрена).** Метасоматоз обычно явление локальное. Продукты процессов метасоматоза – метасоматические горные породы, метасоматиты. Флюиды – жидкие и газовые растворы, главным образом водные растворы, рассолы, углеводороды и иные. Вязкость флюидов на 15-20 порядков ниже, а текучесть настолько же выше, чем у горных пород.

Процессы метасоматоза происходят при миграции флюидов и развиваются в широком интервале глубин – от поверхности Земли до глубоких горизонтов верхней мантии – около 150-200 км. Так, типичными

Обзор метасоматитов

метасоматитами являются коры выветривания. Далее будем рассматривать только эндогенные рудоносные метасоматиты, по существу гидротермально-метасоматические образования. Вертикальный диапазон их распространения в грубом приближении соответствует гидросфере Земли, т.е. от её поверхности до глубин около 10-15 км. Подчеркнём, что гидротермальная деятельность - один из ведущих геологических процессов дифференциации природного вещества.

Общеизвестна неравномерность проявлений метасоматоза, которые приурочены к тектонически ослабленным зонам.

Образование метасоматитов происходит по мере просачивания растворов от подводящей трещины. В телах метасоматитов (их именуют метасоматическими колонками) выделяют передовую (иначе внешнюю) зону, промежуточные зоны, тыловую зону, примыкающую к подводящей трещине, на месте которой обычно развивается рудная жила.

Любой метасоматический процесс в целом необратим, следовательно неравновесен. Дмитрий Сергеевич Коржинский установил, что взаимодействие флюидов с горными породами характеризуется дифференциальной подвижностью компонентов, а продукты взаимодействия – **метасоматиты характеризуются локальным химическим равновесием.** Вследствие этого, тела метасоматитов часто имеют

Обзор метасоматитов

правильную зональность, с чередованием зон различного минерального состава. Наличие чётко отграниченных зон качественно различного минерального состава – характерная черта тел метасоматитов. Это надёжный признак, жёсткий критерий отличия метасоматитов от любых иных образований (магматических пород...). Для метасоматитов характерно массовое развитие псевдоморфоз.

Способ переноса вещества флюидами оказывает существенное влияние на состав и строение тел метасоматитов. Два крайних случая метасоматоза – диффузионный и инфильтрационный.

При **диффузионном метасоматозе** перенос вещества совершается посредством диффузии через застойные поровые воды. Диффузия происходит медленно в направлении меньшего химического потенциала компонента. Для колонок диффузионного метасоматоза характерна изменчивость состава минералов – твёрдых растворов и изменчивость количественных соотношений минералов в пределах каждой метасоматической зоны. Диффузионный метасоматоз проявлен очень широко, но мощность тел метасоматитов при этом не велика – от первых мм до первых м. Типичные примеры – около трещинные метасоматиты, биметасоматические тела, например, многие скарны.

При **инфильтрационном метасоматозе** компоненты переносятся

Обзор метасоматитов

течением просачивающихся флюидов, масштабы метасоматоза значительные, иногда они захватывают много сотне метровые и даже километровые участки. Для колонок инфильтрационного метасоматоза минеральный состав изменяется скачком на границах зон, характерен постоянный состав метасоматитов и слагающих их минералов в пределах каждой конкретной метасоматической зоны.

В природе инфильтрационные процессы всегда так или иначе сочетаются с диффузионными. Два типичных случая их сочетания. 1 – при около трещинном (около жильном) метасоматозе растворы просачиваются по трещинной зоне (здесь инфильтрационный метасоматоз) и медленно диффузионным способом через застойные воды проникают в боковые породы (здесь диффузионный метасоматоз). 2 – при биметасоматозе происходит диффузионное взаимодействие компонентов двух соприкасающихся и способных реагировать пород при движении растворов поперёк контакта, при движении растворов вдоль того же контакта эффекты диффузии подавляются действием более мощного и быстрого инфильтрационного переноса компонентов и биметасоматоз переходит в контактово-реакционный инфильтрационный метасоматоз.

О соотношении метасоматитов и оруденения

1 тип – синхронное, сингенетичное оруденение, когда рудные минералы

Обзор метасоматитов

являются частью определённой зоны метасоматической колонки.

2 тип – сопутствующее, иначе сопряжённое (так сказать, диагенетическое) оруденение. Формируется позднее главного объёма метасоматитов, но генетически связано с тем же этапом гидротермальной деятельности.

Сопряжённое оруденение часто сопровождается узко локальными собственными рудосопровождающими метасоматитами.

3 тип – наложенное, эпигенетическое оруденение. В этом случае роль метасоматитов – лишь благоприятная среда для рудоотложения.

1 и 2 типы – рудоносные метасоматиты, 3 тип – рудовмещающие метасоматиты.

Достаточно условно эндогенные метасоматиты и рудные концентрации делят на высокотемпературные – выше 500°C (по-моему, корректнее – выше 400°C), среднетемпературные от 500 до 300°C (по-моему 400 – 250°C), низкотемпературные от 300 до 100°C (250 – 50°C).

Источники флюидов

По данным изотопного анализа водорода, кислорода, углерода... в минералах метасоматитов и во флюидных включениях в этих минералах – источники множественны. Это вадозовые воды континентов и подводных склонов континентов (пресные, солоноватые, солёные, рассолы, углеводороды); океанские (морские) воды, в том числе захороненные; вадозовые и

Обзор метасоматитов

океанские воды, нагретые и несколько метаморфизованные под действием тепла и флюидов магматических тел; магматические (ювенильные) флюиды; флюиды, возникшие при региональном или локальном метаморфизме особо углеродистых и эвапоритовых (с серой) толщ; смешанные. Последних вероятно более всего.

Химизм природных флюидов

Решительно преобладают разнообразные водные растворы. Самые распространённые близки к нейтральным, значительно менее распространены кислые (с ионом водорода – с преобладанием кислот: угольной H_2CO_3 , соляной HCl , серной H_2SO_4 , фтористоводородной HF) и щелочные (с ионом гидроксила – с преобладанием щелочей натрия, реже калия). Главная масса водных растворов имеет концентрацию растворённых веществ, близкую к 3.5 масс. %, средней концентрации океанских вод. Вод почти чистых, с концентрацией растворённых веществ менее 0.1 %, очень мало. Растворов более концентрированных, чем океанская вода, также не так много. Главные типы растворов примерно одинаковы на поверхности и в глубинах земной коры.

Океанские воды. Солей 35 кг/т. Содержания ионов – хлора 20 кг/т, натрия 10 кг/т, магния 1.5 кг/т, калия и кальция по 0.5 кг/т.

Сульфатные воды до рассолов. Чрезвычайно характерны для аридных областей, обычно внутри континентальных. Обогащены Ca , Mg , Na .

Обзор метасоматитов

Содовые воды – щелочные углекисло-натровые воды. Развиты местами во внутри континентальной обстановке.

Поташевые воды – щелочные углекисло-калиевые воды. Редкие, развиты во внутри континентальной обстановке.

Нефтяные воды. Солей до 300 кг/т. Содержания ионов – хлора до 180 кг/т, натрия до 90 кг/т, кальция до 20 кг/т, магния по 4 кг/т.

Рассолы, сопряжённые с соляными месторождениями. Такие рассолы нередко концентрируются на границе осадочной оболочки (плитного чехла) и кристаллического фундамента платформ (юг Восточно-Сибирской дорифейской платформы...). Солей до 500-690 кг/т. Содержания ионов хлора и кальция до 300 кг/т, магния до 200 кг/т, натрия до 100 кг/т, калия до 10-20 кг/т...

Вообще в осадочной оболочке преобладают водные растворы с NaCl, но с глубиной в них почти повсеместно возрастает концентрация CaCl₂.

Геотермальные рассолы Солтон-Си (запад США) (с глубины 1.5 км, которые в настоящее время отлагают серебряно-медные руды). Солей около 300 кг/т. Содержания ионов хлора 180 кг/т, натрия 55 кг/т, кальция 40 кг/т, калия 25 кг/т, лития 0.5 кг/т...

Термальные воды гейзеров вулканов толеитовой, известково-щелочного и щелочной серии (без карбонатитов). Несколько типов.

Обзор метасоматитов

Периферийные – нейтральные до слабо щелочных, слабо минерализованные хлоридно-натровые (1-6 кг/т NaCl) и бикарбонатно-хлоридно-натровые (1-12 кг/т NaCl). Воды собственно гейзеров – кислые хлоридно-сульфатные. Воды кратерных озёр и вытекающих из них источников (до приличных рек) – кислые до ультракислых с $\text{pH} < 1$, солянокислые, но главным образом сернокислые, с минерализацией до 100 кг/т, с переменными количествами H_2SO_4 , HCl, HF, H_2S , S, SO_2 , NH_4Cl , As, HBr, Hg, Sb, Li...

Термальные воды источников вулканов щелочной и ультращелочной серии с карбонатами. Воды высоко щелочные, натровые, насыщенные CO_2 и SiO_2 .

Современные гидротермы Байкальской рифтовой зоны. Перечислены в порядке распространённости – сульфатно-натровые (часто с H_2S), гидрокарбонатно-сульфатно-натровые (часто с H_2S), фторидно-гидрокарбонатно-натровые, фторидно-гидрокарбонатно-сульфатно-натровые (часто с H_2S), хлоридно-сульфатно-натровые, хлоридно-гидрокарбонатно-натровые, хлоридно-натровые, гидрокарбонатно-натровые, сульфатно-гидрокарбонатно-кальциево-магниевые...

Почти во всех типах природных вод важна роль газовых компонентов: прежде всего CO_2 , менее H_2S , CH_4 , H_2 , NH_3 , O_2 и более редких. Количество CO_2 может достигать 50-70 % объёма флюида.

Обзор метасоматитов

Итак, существует большое разнообразие составов природных флюидов, чему соответствует состав газовой-жидких включений в жильных и рудных минералах и большое разнообразие эндогенных метасоматитов. При воздействии на горные породы кислых флюидов возникают метасоматиты – продукты кислотного выщелачивания, где полевые шпаты замещены слюдами, гидрослюдами, глинистыми минералами (грейзены, аргиллизиты...). При воздействии на горные породы щелочных флюидов возникают метасоматиты щелочного типа, практически без кварцевые (фениты, эгириниты, содалитовые и канкринитовые породы, эйситы...). При воздействии квази нейтральных флюидов возникли такие метасоматиты как скарны, натровые пропилиты. Существуют метасоматиты, образованные под действием существенно хлоридных флюидов, - скарны; существенно фторидных флюидов – грейзены, цвиттеры; существенно сернокислых флюидов – вторичные кварциты, алунитовые метасоматиты. При этом, надо иметь в виду, что с ростом температуры величина рН нейтральных водных растворов сдвигается от 7 к 5 и менее. Большое влияние температуры на величину кислотности флюидов обусловлено и тем, что степень диссоциации кислот минимальна при $T > 600^\circ \text{C}$ и максимальна при $300\text{-}400^\circ \text{C}$.

Обзор метасоматитов

Величина Eh природных растворов в наибольшей степени и почти повсеместно определяется реакциями с железосодержащими минералами; главный буфер магнетит–гематитовый $\text{Fe}_3\text{O}_4 - \text{Fe}_2\text{O}_3$. Только степень изменения соотношения $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ в метасоматитах по сравнению с исходными породами может указать на окислительный или восстановительный характер взаимодействия флюида с породами.

Тела и ореолы эндогенных метасоматитов – результат деятельности гидротермальных систем геологического прошлого. Продолжительность их деятельности (жизни) можно оценить по экспериментальным данным о скорости разрастания метасоматических колонок: оценки от первых тысяч лет до нескольких сот тысяч лет. Эти оценки близки к оценкам времени деятельности современных вулканогенных гидротермальных систем на континентах и в океанах.

Параметры водных флюидов (растворов)

При низких давлениях (до 0.2 кбар) плотность воды с ростом температуры до 370°C постепенно снижается от 1 г/см³ до 0.6. В критической точке $\sim 375^\circ\text{C}$ жидкое и газообразное состояния воды становятся неразличимыми, плотность ~ 0.3 . Температура критической точки воды растёт с ростом давления. Ниже дана плотность водного флюида для различных величин температуры и давления.

Плотность водного флюида, г/см³ для различных величин температуры и давления

	0.5 кб	1 кб	2 кб	5 кб	10 кб
100° С	1.0	1.0	1.0	1.1	1.2
300° С	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
500° С	0.2	0.5	0.7	0.9	1.0
750° С	0.1	0.2	0.5	0.7	1.0

Внутри Земли ρ флюид. \approx ρ литостат. \rightarrow ρ H₂O \approx ρ литост. Средний геотермический градиент около 20° С/км, плотность 2.6 г/см³. Таким образом, на глубине 5 км – ρ H₂O \sim 1.3 кб, $T \sim$ 100° С; на глубине 10 км ρ H₂O \sim 2.6 кб, $T \sim$ 200° С. Сравнивая, видно, что плотность водного флюида будет оставаться близкой к 1. Таким образом, можно ожидать весьма плавного изменения физических и химических свойств воды с ростом глубины. В

Обзор метасоматитов

условиях низких давлений и высоких температур (при контактовом метаморфизме...) могут проявляться более резкие изменения свойств воды, связанные со значительным уменьшением плотности флюида. В некоторых случаях происходит вскипание флюида, разделение исходно гомогенного флюида на «фракции» различного состава, - например, существенно водные и существенно углекислотные...

Диссоциация воды $H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$ существенно возрастает в области температур 300-500° С при давлении 1-2 кбар. В области «главной» для рудообразования вода химически наиболее агрессивна.

О систематике метасоматитов

Генетическая классификация предполагает: 1) чтобы метасоматические процессы рассматривались как совокупность изменений, происходящих в различных зонах метасоматической колонки; 2) чтобы систематика этих процессов или соответствующих совокупностей метасоматических пород была проведена в той естественной последовательности, в которой они возникли в природе; 3) чтобы учитывались сопряжённые магматические образования и тектоническая позиция метасоматитов. Эти принципы намечены Д.С. Коржинским в 1953 г. и конкретизированы В.А. Жариковым в 1956 г. и в последующее время.

В качестве главного элемента классификации взята метасомати-

Обзор метасоматитов

ческая формация – совокупность метасоматических пород, образованных в результате одного петрогенетического процесса в определённой геологической обстановке.

Каждая метасоматическая формация представляет сумму метасоматических фаций, отличающихся составом исходных пород (протолитов), степенью преобразований, температурой образования, глубиной процессов, разным составом метасоматизирующего флюида : соотношениями K^+/H^+ , K^+/Na^+ , $f CO_2$, $f H_2S$...

Приступаем к рассмотрению конкретных эндогенных метасоматических формаций и сопряжённых рудных концентраций (месторождений). Существуют метасоматические формации магматогенные и амагматичные, связанные с зонами региональных разломов.

Магматогенные рудоносные метасоматические формации

Большая часть рудоносных метасоматитов развиты в складчатых поясах (в том числе, в фундаменте платформ), меньшая – в плитном чехле активизированных платформ.

Значительная часть рудоносных метасоматитов сопряжена с интрузивами гранитоидов. В складчатых областях основная масса гранитоидов возникает в течение инверсионного (коллизийного) этапа (ранее -

Обзор метасоматитов

этапа главной складчатости) – тоналит-гранодиоритовая и гранодиорит-адамеллитовая формации, и на после инверсионном орогенном этапе – формации монцонит-граносиенит-гранитная → стандартных гранитов → лейкогранит-аляскитовая (и литий-фтористых гранитов) → щелочных гранитов. В активизированных платформах развиты формации гранитов – рапакиви – лейкогранитов, щелочных гранитов – граносиенитов.

Для понимания дальнейшего рассмотрим устройство интрузивных формаций – интрузивных комплексов. Интрузивный комплекс – совокупность геологически одновозрастных интрузивных тел (интрузивов, плутонов) и даек определённой тектонической единицы, имеющих все признаки генетического родства и сопровождаемые однотипными рудными концентрациями. Интрузивы образованы телами одной или нескольких (обычно 2-3) интрузивных фаз, каждое со своим внутренним строением и экзоконтактовым ореолом ороговикованных пород, с собственной жильной серией (аплиты, жильные граниты, пегматиты, кварцевые и иные жилы). Интрузивная фаза отвечает дискретной подаче магматического материала из глубинных источников. Интрузивные тела каждой фазы могут сопровождать послемагматические высокоТ гидротермальные метасоматиты: Mg и Ca скарны, кварц-микроклин-альбитовые метасоматиты (апограниты), кварц-мусковитовые метасоматиты с гранатом и турмалином (псевдо-грейзены), цвиттеры, грейзены, кварц-турмалиновые метасоматиты с

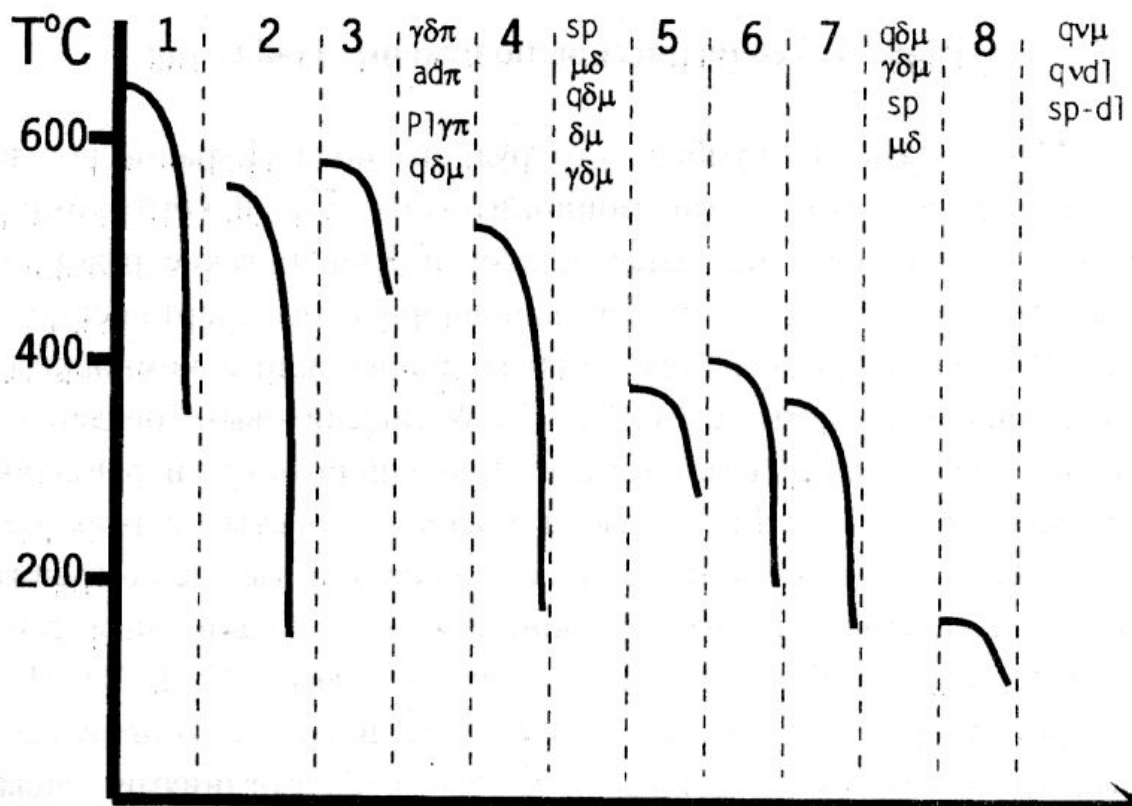
Обзор метасоматитов

редкометальным оруденением. Они нередко чередуются с жилами аплитов и жильных гранитов. Эти образования, связанные с «жизнью» данного магматического тела, профессор В.С. Коптев-Дворников выделил как образования 1 этапа. Длительность 1 этапа первые сотни тысяч лет. К концу 1 этапа интрузивное тело успевает остыть примерно до T окружающих толщ (породы рамы интрузива).

В дальнейшем магматический материал поступает в гораздо меньшем количестве из промежуточных или глубинных очагов, формируя дайки и малые интрузивы разнообразных гранитоид-порфиров, состав которых близок к составу гранитоидов интрузивных тел. С этими дайками и малыми интрузивами ассоциируют K и Na пропициты, кварц-серицитовые и иные метасоматиты и Mo-Cu-порфировое оруденение.

Формирование интрузивных комплексов завершается внедрением даек глубинного происхождения, которые содержат ксенолиты пород, залегающих ниже интрузивных тел гранитоидов. У этих даек прямолинейные контуры, резко охлаждённые – закалённые контакты. С этими дайками ассоциируют средне- и низко T гидротермальные метасоматиты – Na пропициты, гумбеиты с шеелитовым оруденением, березиты-листвениты с золотым оруденением, аргиллизиты с аметистовой минерализацией. Всё это образования 2 этапа по В.С. Коптеву-Дворникову.

Последовательность формирования плутоногенных гидротермалитов и даек глубинного происхождения тоналит-гранодиоритовых комплексов (Спиридонов, 1995)



Рудные концентрации

Fe, Cu (Co, W Mo, Bi)	Cu Mo (Re Se)	(W)	Au W (Ag Sb Te Bi)	(Sb)
-----------------------------	------------------------	-----	-----------------------------------	------

- 1 – Mg скарны с гидроксилфлогопитом и Fe (Cu) оруденением;
- 2 – Ca скарны с Fe (Co-Cu-W) оруденением;
- 3 – кварц-турмалиновые и кварц-серицитовые метасоматиты с турмалином;
- 4 – K пропилиты с Mo-Cu-порфировым оруденением;
- 5 – Na пропилиты;
- 6 – гумбеиты с шеелитовым оруденением;
- 7 – березиты и листовениты с золотым оруденением;
- 8 – аргиллизиты

1-3 – образования первого этапа
4-8 – образования второго этапа

Обзор метасоматитов

Среди даек 2 этапа – петрологически родственные гранитоидам интрузивных тел гранитоид-порфиры, гранодиорит-, тоналит- и кварцевые диорит-порфиры, кварцевые микродиориты и петрологически чужеродные спессартиты (и керсантиты), производные базальтовых расплавов, малые порции которых «вплетены» в гранитоидные формации.

Общая длительность формирования конкретных интрузивных комплексов менее 3 млн. лет, возможно менее 1.5 млн. лет. Очевидно, что длительность после магматических гидротермальных систем менее 0.5 млн. лет. Судя по диаграмме на предыдущей странице, каждая из показанных гидротермально-метасоматических формаций дискретна, самостоятельна, её нельзя вывести из предыдущей.

Щелочные интрузивные формации сопровождают щелочные метасоматиты – фениты, камафориты, мариуполиты (эгирин-альбитовые метасоматиты с обильным цирконом), содалитовые, канкринитовые, биотит-кальцитовые и иные метасоматиты.

Обзор метасоматитов

Вулканогенные рудоносные метасоматические формации

Как и плутоногенные, данные образования крайне разнообразны. Мы рассмотрим только отдельные наиболее важные из них. Это сернокислые и хлористоводородные аргиллизиты и листовенитоподобные аргиллизиты = зодиты (гидротермальные глинистые и/или гидрослюдистые метасоматиты) с Au, Au-Ag, Hg, Sn оруденением; фтористоводородные аргиллизиты с Be оруденением; калиевые пропилиты, хлоритолиты и кварц-серицитовые метасоматиты с колчеданным Ag-Pb-Zn-Cu оруденением и эпитептермальным Au-Ag оруденением; вторичные кварциты с рудами Al (алуниты), пирофиллита, корунда и серы. По данным изотопного датирования палеогидротермы существовали менее 0.2-0.6 млн. лет. Современные рудоносные гидротермы в областях активного вулканизма действуют от первых десятков – сотен лет до 200.000 лет.

Рудоносные метасоматиты зон региональных разломов

Это прежде всего щелочные ураноносные метасоматиты : альбититы с эгирином, щелочными амфиболами, магнетитом; гумбеито-подобные метасоматиты; эйситы. Аргиллизиты и джаспероиды с Sb, Hg, Au, CaF₂, BaSO₄... оруденением.