

УДК 550.42:549.32/.33 (261)

Сяоли Ли¹, А.Ю. Леин², А.А. Ульянов³

МИКРОЭЛЕМЕНТЫ И ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ В СУЛЬФИДАХ ИЗ ЧЕРНЫХ КУРИЛЬЩИКОВ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО ПОЛЯ БРОКЕН СПУР (Срединно-Атлантический хребет)⁴

Изучение распределения микроэлементов в сульфидных минералах из гидротермального поля Брокен Спур (САХ) позволило предположить существование наноминеральных фаз для ряда микроэлементов, в том числе для Au и Ag.

Ключевые слова: Брокен Спур, сульфиды, микроэлементы, наноминеральные фазы.

Distribution of rare elements in sulfides from hydrothermal vent field Broken Spur (MAR) suggests the presence of nano-mineral phases for some trace elements, including Au and Ag.

Key words: Broken Spur, sulfides, trace elements, nano-scale minerals.

Введение. Гидротермальное поле Брокен Спур расположено в пределах одного из сегментов рифта Срединно-Атлантического хребта (САХ) на 29 °с.ш. на глубине около 3000 м. Первые сведения о нем получены в 76-м рейсе НИС «Чарльз Дарвин» в 1992 г. [Богданов, Сагалевич, 2002]. Дальнейшие исследования проведены с использованием глубоководных обитаемых аппаратов (ГОА) «Алвин» и «Мир» [BRAVEX/94, 1994]. На его площади (~10 000 м²) открыто более 10 гидротермальных построек, значительная часть которых в настоящее время еще активна. Общее время его существования не более 1000 лет [Богданов и др., 2006]. Брокен Спур — типичное гидротермальное поле низкосрединного хребта, генетически связанное с вулканитами; это одно из самых молодых гидротермальных полей, в пределах которого формируются сульфидные руды. Брокен Спур содержит информацию о самых ранних, начальных стадиях процесса гидротермального рудонакопления. При проведении детального минералогического изучения представительной коллекции образцов мы установили относительно высокую концентрацию золота и серебра в сульфидных минералах [Ли и др., 2008], чем и обусловлен наш повышенный интерес к их изучению.

Материалы и методы исследования. Материалы для исследования собраны сотрудниками Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН в трех рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш» (1994, 2000 и 2005) при погружениях ГОА «Мир». Анализ большего объема полученных нами аналитических данных позволил выбрать образец N4797-3 (из постройки Спаир) в качестве основного объекта изучения. Определение химического состава минеральных фаз и содержания в них Ag и Au осуществляли на электронно-зондовом

микроанализаторе «Cameca SX-50», снабженном тремя волновыми спектрометрами при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе зонда на образце в 30 нА. Эталонами служили аттестованные синтетические и природные минералы. На заключительном этапе расчета химического состава минералов проводили стандартную процедуру введения PАР-коррекции.

Микрозондовые исследования и их результаты. Первоначально мы провели точечные микрозондовые анализы массивного агрегата зерен марказита. Расстояние между точками составляло 50 мкм. На основании полученных аналитических данных выбраны три участка с размерами 40×30, 60×30 и 60×60 мкм с максимально высокой концентрацией золота.

При дальнейших микрозондовых исследованиях для первых двух площадок диаметр зонда составлял 1–2 мкм, а шаг зонда — 3 мкм. Для третьей площадки проведено микрозондовое сканирование. Каждый анализ осуществлялся на площади 5×5 мкм; шаг зонда составлял 5 мкм. В дальнейшем при помощи компьютерной программы Surfer вся полученная аналитическая информация переведена в топографические модели, которые описывали распределения Au и Ag на изученных площадках марказита (рис. 1). Компьютерное наложение цветных карт позволило оценить степень совпадения значений концентрации Au и Ag. Если допустить присутствие тонкодисперсного самородного золота в марказите, то на картах распределения Au и Ag следовало бы ожидать совпадения максимумов. Однако аналитические данные показывают, что подобная закономерность проявилась не во всех случаях. Несовпадение максимумов Au и Ag может свидетельствовать о присутствии этих элементов в разных минеральных фазах, размер которых существенно меньше диаметра зонда.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, аспирант, e-mail: syaoli@mail.ru

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, профессор, докт. геол.-минер. н., e-mail: lein@ocean.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, профессор, докт. геол.-минер. н., e-mail: ulyanov@geol.msu.ru

⁴ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 09-05-00164).

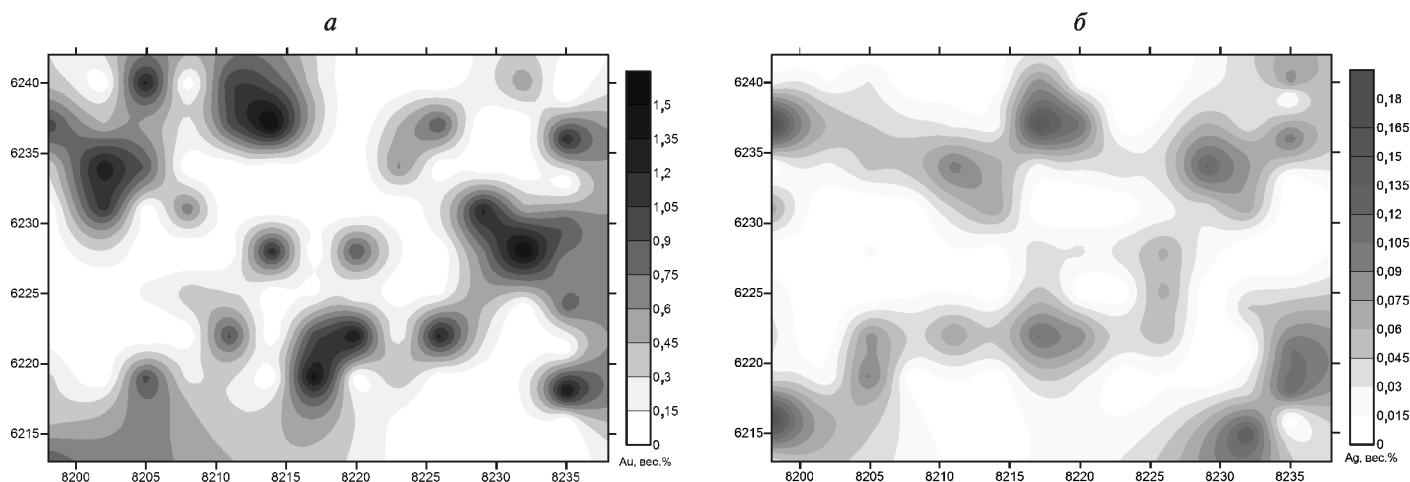


Рис. 1. Карты распределения Au (а) и Ag (б) на площадке 30×40 мкм в марказите из Брокен Спур

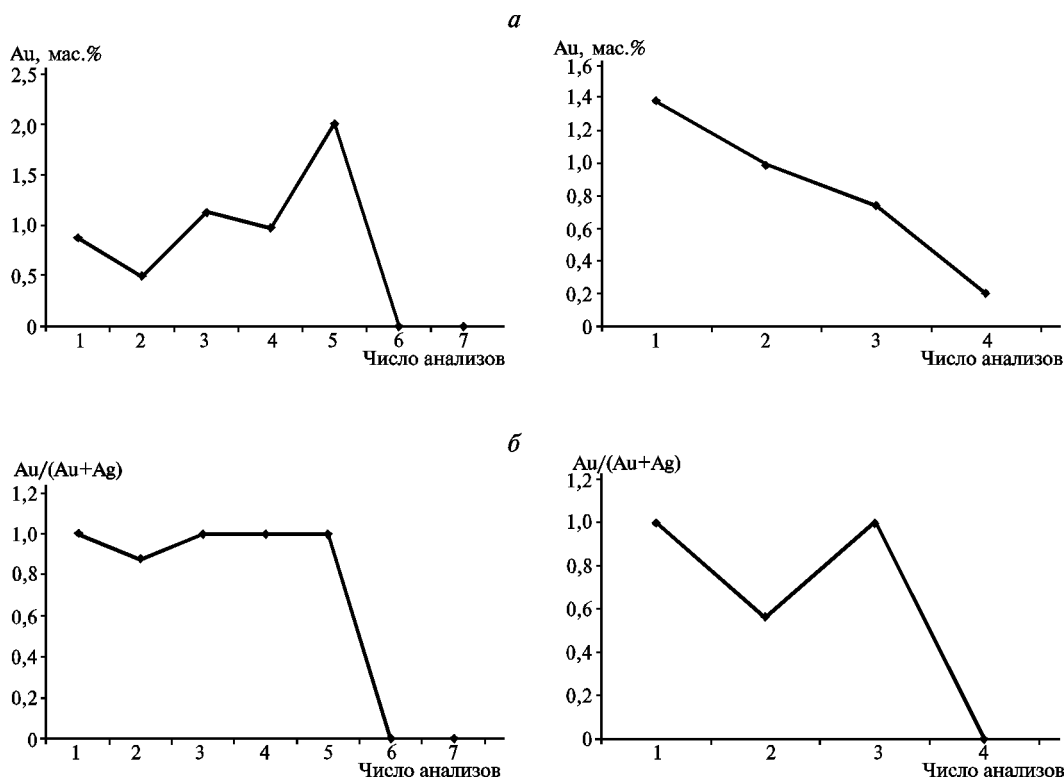


Рис. 2. Характер изменения концентрации Au (а) и величины отношения Au/(Au+Ag) (б) в марказите от числа проведенных микрозондовых анализов в одной точке

Косвенно на присутствие «нанофаз» с различным содержанием Au и Ag указывает также кажущаяся невозпроизводимость некоторых повторных анализов, которую можно объяснить различной миграционной способностью Au и Ag в разных минеральных «нанофазах» (рис. 2).

Чтобы подтвердить предположение о существовании минеральных фаз Au и Ag в наномасштабе, мы провели аналогичную работу, увеличив при этом число минералов и расширив набор определяемых элементов-примесей. Из того же образца (N4797-3) нами выбраны три минерала — пирит, сфалерит и

халькопирит. В них определяли: As, Pb, Au, Ag, Se в пирите, As, Pb, Sb, Au, Ag, Cd в сфалерите и Au, Ag, Sn, Te, Se, Sb в халькопирите. Для увеличения точности определения концентрации элементов-примесей были несколько изменены условия проведения анализа на микрозонде: ускоряющее напряжение увеличено до 20 кВ, а сила тока на образце повышена до 50 нА; время набора статистики составляло от 20 до 30 с.

Для каждого минерала выбрали подходящий участок размером 30×30 мкм. При анализе диаметр зонда составлял 1,5–2 мкм, а промежуточный шаг зонда — 3 мкм. Полученные аналитические данные

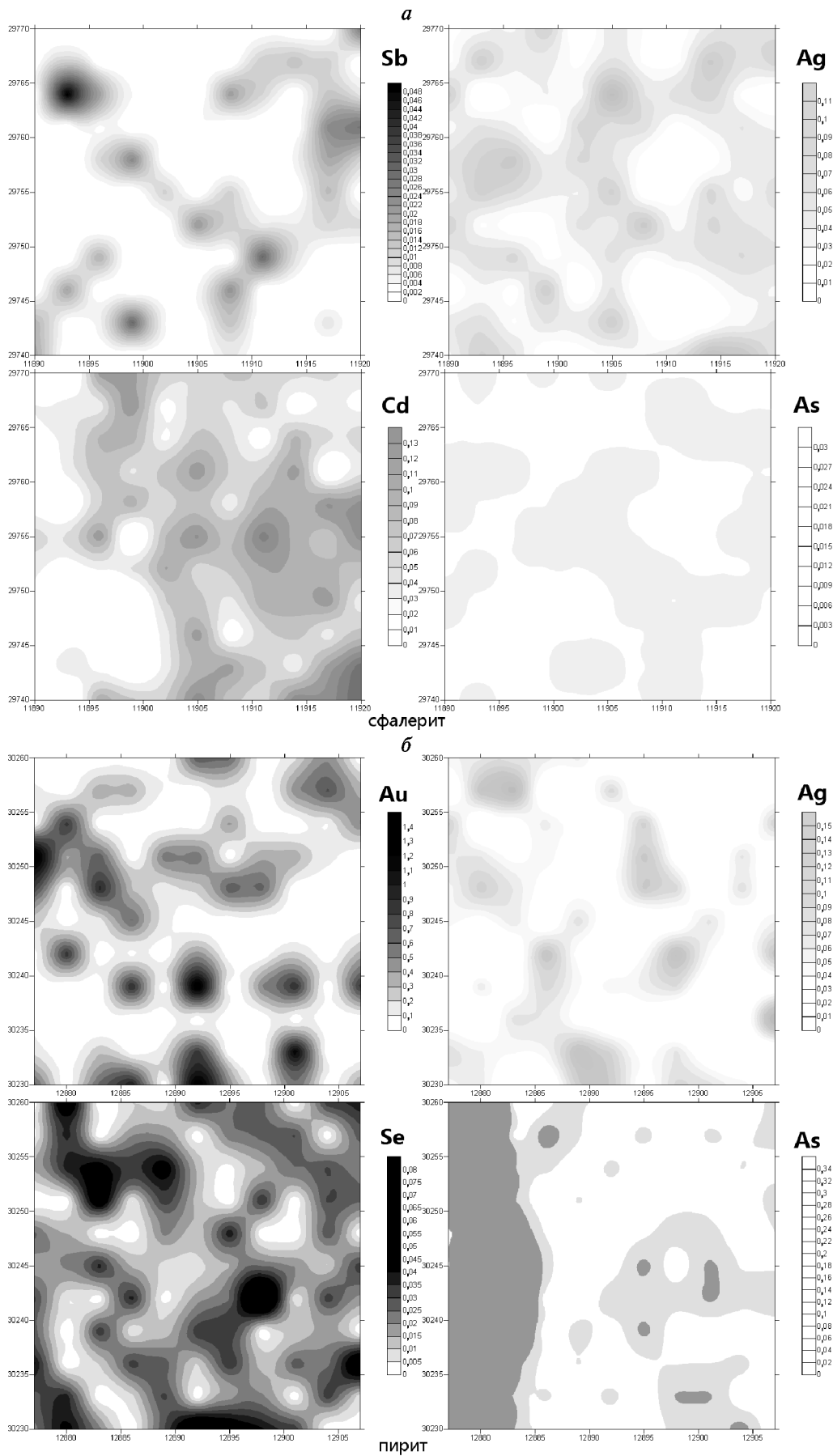


Рис. 3. Карты распределения элементов-примесей Sb, Ag, Cd, As в сфалерите (а), Au, Ag, Se, As

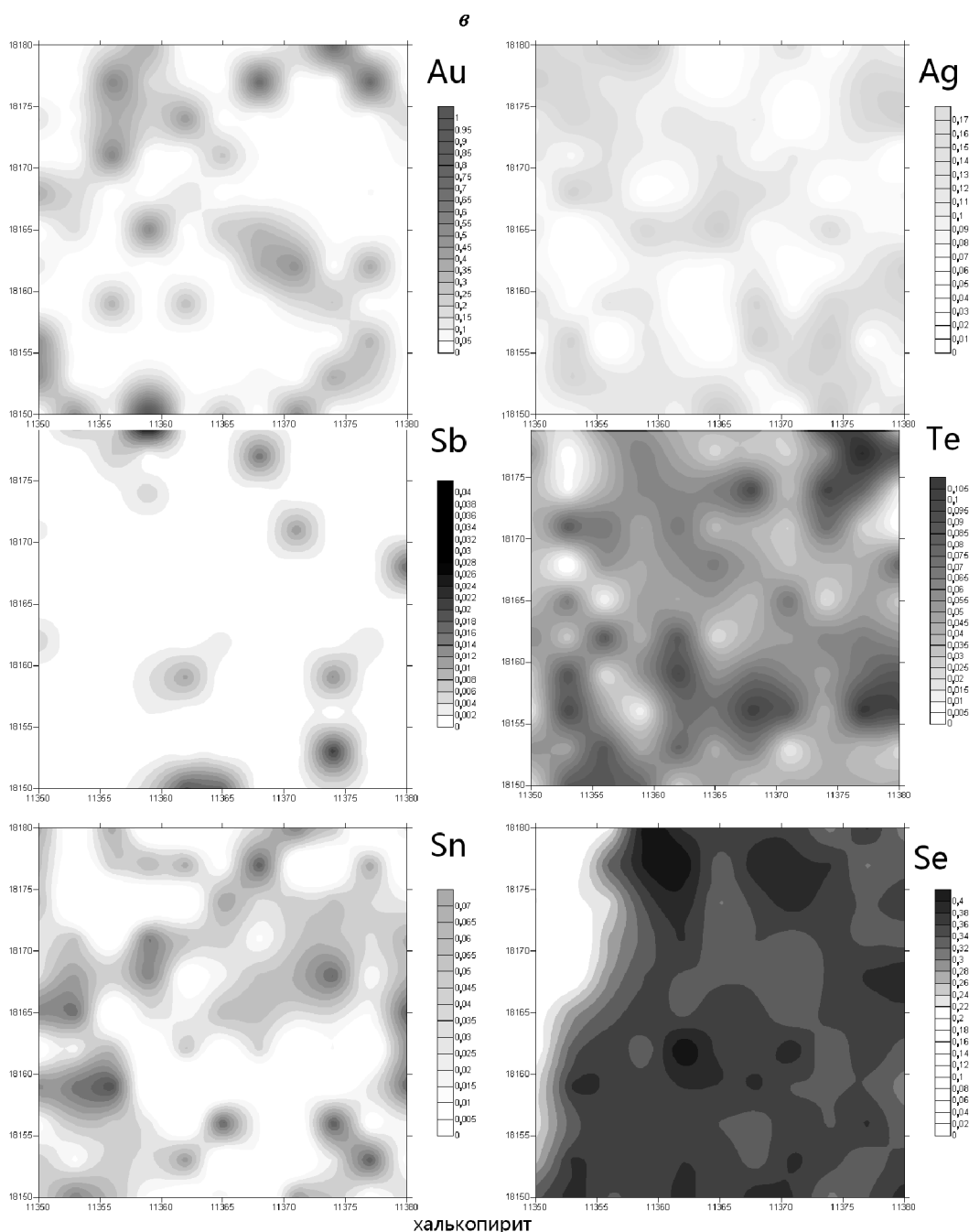
также переведены в графический формат — в карты распределения разных элементов-примесей в каждом изученном минерале (рис. 3).

Анализ карт распределения концентрационных уровней элементов-примесей четко показывает на внутреннюю микроскопическую неоднородность изученных сульфидов. Отсутствие значимых межэлементных корреляций для всего массива аналитических данных, вероятно, указывает на разнообразие минеральных «нанофаз» и, возможно, их сростаний — основных носителей примесных элементов в сульфидных рудах.

Например, в изученном халькопирите данные о распределении элементов-примесей позволяют говорить о нескольких бинарных (и тройных) ассоциациях элементов, явно носящих неслучайный характер. Для золота это такие элементы, как $Ag(\pm Sn, Sb)$, $Te(\pm Se)$, для серебра преимущественно Te, Sn, Sb ; также возможна ассоциация $Te-Sb$ и $Te-Sn$ (рис. 4).

Выводы. 1. В сульфидах из гидротермального поля Брокен Спур установлено повышенное содержание золота.

2. Формы нахождения Au в сульфидах разнообразны, кроме изоморфной возможна не только



в пирите (б), и Au, Ag, Sb, Te, Sn и Se в халькопирите (в) из Брокен Спур на площадке 30×30 мкм

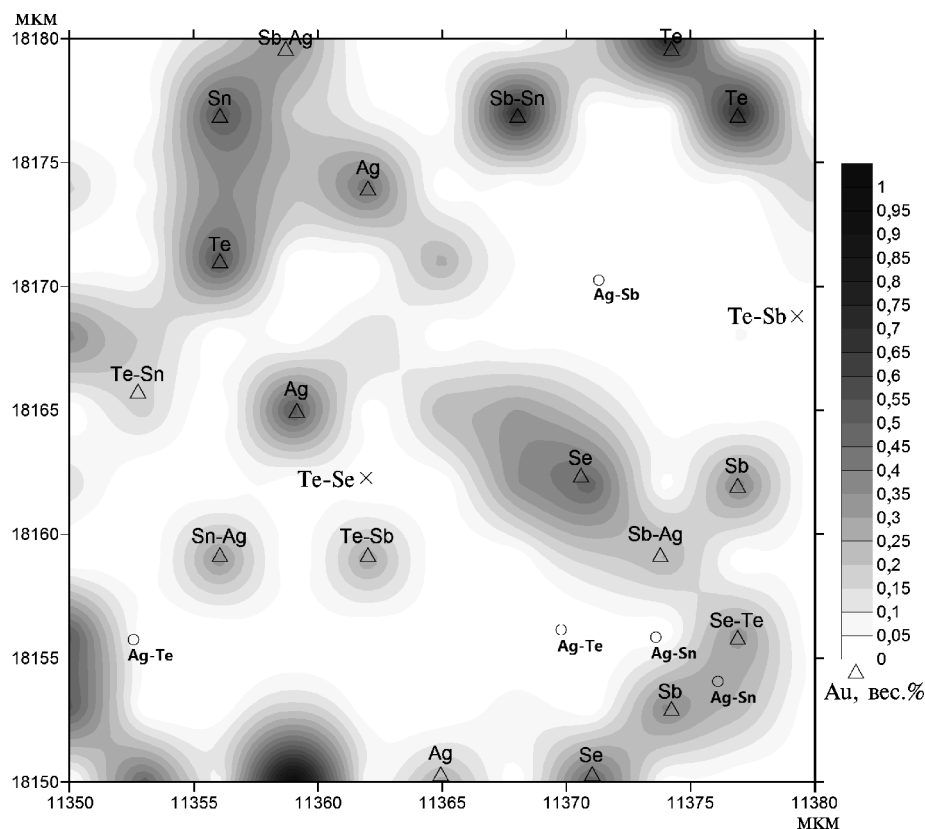


Рис. 4. Ассоциации элементов-примесей в халькопирите из Брокен Спур

самородная, но и другие минеральные формы, размеры которых существенно меньше 1 мкм.

3. Аналогичное заключение можно сделать и для других элементов-примесей — As, Sb, Te, Se и Sn, минеральные носители которых представлены в «нанофазах».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Богданов Ю.А., Лисицын А.П., Сагалевич А.М., Гурвич Е.Г. Гидротермальный рудогенез океанского дна. М.: Наука, 2006.

Богданов Ю.А., Сагалевич А.М. Геологические исследования с глубоководных обитаемых аппаратов «Мир». М.: Научный мир, 2002.

Ли Сяоли, Леин А.Ю., Ульянов А.А. Сульфидная минерализация черных курильщиков из гидротермального поля

4. Даже в наномасштабе геохимическое сродство элементов сохраняется, что приводит к устойчивым ассоциациям элементов-примесей в изученных нами минералах.

Авторы выражают благодарность за помощь в получении аналитических данных И.А. Брызгалову (МГУ).

Брокен Спур (СХ) // Уральская минералогическая школа-2008. Минералогия ультрабазит-базитовых комплексов. Екатеринбург: ИГГ Уро РАН, 2008.

BRAVEX/94 Scientific team. BRAVEX/94: a joint British-Russian expedition to the Broken Spur and TAG hydrothermal vent sites on the Mid-Atlantic Ridge // BRIDG Newslett. 1994. N 7. P. 6–9.

Поступила в редакцию
08.12.2009