

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»  
(СПбГУ)  
Институт наук о Земле  
Кафедра геохимии

**Коршунова Дария Вячеславовна**

**Геохимия и внутреннее строение сульфидного гидротермального  
поля S-1 (море Бисмарка, Тихий океан)**

Выпускная квалификационная работа  
по направлению 13.5018.1 «Геология»

«К ЗАЩИТЕ»

Научный руководитель:

д.г.-м.н., проф. Г.А.Черкашев

---

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018

Заведующий кафедрой:

д. г.-м.н, проф. М.В.Чарыкова

---

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018

Санкт-Петербург

2018

## Оглавление:

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ЦЕЛЬ РАБОТЫ: .....	4
ПОСТАВЛЕННЫЕ ЗАДАЧИ: .....	4
1. СУЛЬФИДНЫЕ РУДЫ.....	5
1.1 Рудопроявления активных спрединговых хребтов .....	8
1.2 Рудопроявления зон внутриплитового вулканизма .....	10
1.3 Рудопроявления субдукционных зон.....	10
1.3.1 Рудопроявления активных задуговых бассейнов.....	11
2. МЕСТОРОЖДЕНИЕ S-1.....	13
2.1 Краткая характеристика .....	13
2.2 История открытия .....	13
2.3 Физико-географическое положение и климатические условия... ..	14
2.4 Геологическая позиция.....	16
2.5 Геология месторождения S-1:.....	17
3. ХАРАКТЕРИСТИКА ФАКТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА .....	20
4. МЕТОДИКА.....	21
5. МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РУДНОГО ПОЛЯ S-1	23
6. ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА .....	39
РУДНОГО ПОЛЯ S-1 .....	39
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	55
ВЫВОДЫ.....	56
ИСТОЧНИКИ .....	58
Приложение .....	61

## ВВЕДЕНИЕ

В связи со стремительной выработкой наземных месторождений с каждым годом возрастает интерес специалистов геологических областей к альтернативным источникам полезных ископаемых. В настоящее время исследование рудопроявлений Мирового океана является одной из наиболее молодых и перспективных отраслей геологии. На сегодняшний день известно более ста гидротермально активных участков, в пределах которых происходит разгрузка высокотемпературных флюидов с образованием массивных руд и металлоносных осадков. Наиболее широко это явление проявлено в Атлантическом, Тихом, Индийском океанах, а также в Средиземном море (P.E. Halbach, Y.Foquet, P.Herzig, 2001). Изучение гидротермально активных зон и их продуктов имеет не только научный интерес, но и большое практическое значение. В настоящее время существует несколько проектов по разработке подобных объектов и добыче полезных компонентов, одним из которых является S-1.

Канадская компания «Nautilus Minerals» занимается разведкой и изучением массивных сульфидных руд в море Бисмарка в западной части Тихого океана. Часть информации, полученной в ходе экспедиции 2012 года, легла в основу фактического материала данной выпускной квалификационной работы.

## **ЦЕЛЬ РАБОТЫ:**

Изучение строения рудных тел месторождения S-1, минералогической зональности и характера распределения основных рудных элементов (Cu, Zn, Pb, Au).

## **ПОСТАВЛЕННЫЕ ЗАДАЧИ:**

1. Характеристика минерального состава руд и пород с выделением типов
2. Изучение геохимических особенностей состава руд с привлечением статистического анализа результатов лабораторных исследований по основным рудным элементам и попутным
3. Построение разрезов рудных тел
4. Изучение распределения основных рудных элементов (Cu, Zn, Pb, Au) по разрезам
5. Характеристика внутреннего строения рудного поля S-1

Выражаю благодарности своему научному руководителю, д.г.-м.н., профессору СПбГУ Черкашёву Г.А. за руководство работой, сотрудникам ФГБУ «ВНИИОкеангеология» Фирстовой А.В., Степановой Т.В., Мусатову А.Е. за консультации по выполненной работе; сотрудникам ресурсных центров «Рентгенодифракционные методы исследования», «Геомодель» в содействии и помощи при проведении анализов.

## 1. СУЛЬФИДНЫЕ РУДЫ

Сульфидные гидротермальные руды Мирового океана привлекают внимание исследователей уже почти полвека. Первые образцы сульфидов из рудных построек, расположенных на базальтах, были подняты в 1978 г. во время работ франко-американско-мексиканской экспедиции по изучению осевой части Восточно-Тихоокеанского поднятия в районе 21°с.ш. с помощью подводного обитаемого аппарата (ПОА) «Сиана». Примерно в этом же районе год спустя ПОА «Алвин» были обнаружены «чёрные курильщики» - выходы на поверхность дна через трубообразные каналы рудных тел горячих (около 350°С) растворов, насыщенных минеральной взвесью. Помимо своеобразной минеральной ассоциации эти образования сопровождаются наличием вокруг них уникальных биоценозов, существующих на дне океана автономно, без привязки к солнечной энергии и традиционным источникам питания, что привлекает к себе внимание не только геологов, но и специалистов биологической области естественных наук.

Формирование океанических гидротермальных руд связано с миграцией рудоносного раствора, представляющего собой океанскую воду, опустившуюся в кору по открытым трещинам и потерпевшую преобразования в связи с высокотемпературным взаимодействием с породами коры и верхней мантии. В качестве таких преобразований можно назвать трансформацию раствора из слабощелочного окислительного в кислый восстановительный, повышение концентраций Cu, Zn, Fe, Mn, Pb, обогащение его сероводородом, водородом, метаном. По данным исследований, основным процессом, повышающим концентрации химических элементов во флюиде, является выщелачивание элементов из породы, а не дегазация магмы, хотя на небольших глубинах при меньшем

давлении доля участия этого процесса возрастает. Значительная доля металлов во флюиде связана с двумя типами лигандов – восстановленными S видами ( $\text{HS}^-$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) и хлоридными ионами ( $\text{Cl}^-$ ), причём для образования сульфидных залежей суммарное содержание растворённой серы должно значительно превышать суммарное содержание растворённых металлов (P.E. Halbach, Y.Foquet, P.Herzig, 2001). При подъёме высокотемпературного рудоносного раствора от зоны нагрева (от магматической камеры) к поверхности дна (восходящий поток гидротермальной циркуляционной системы) при частичной разгрузке формируются вкрапленные и штокверковые руды (Богданов Ю.А., Лисицын А.П., Сагалевич А.М., Гурвич Е.Г., 2006). Основная разгрузка растворов происходит у поверхности дна, в зоне контакта с холодной океанской водой, проявляющей сильные окислительные свойства, на своеобразном термохимическом барьере. В этой зоне формируются массивные сульфидные руды (см.рис.1).

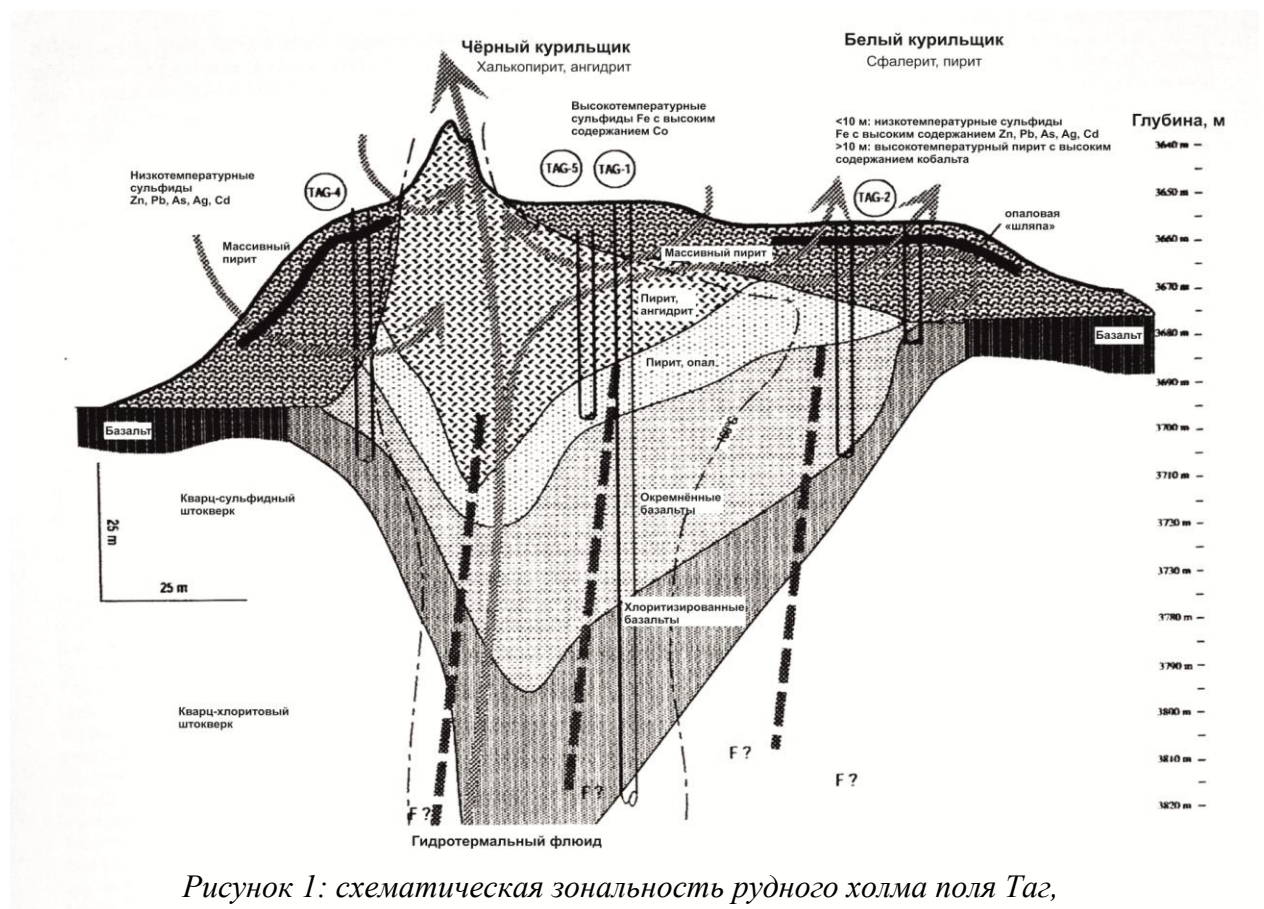
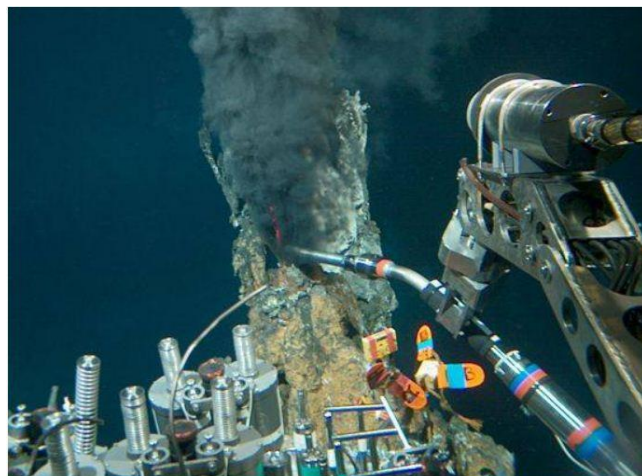


Рисунок 1: схематическая зональность рудного холма поля Таг, Срединно-Атлантический хребет (Fouquet Y., 1998)

Залежи массивных руд в большинстве своём изометричны по конфигурации. Рудные постройки имеют высоту до нескольких метров, а по форме могут напоминать конус (классические «чёрные курильщики»), цилиндр (рудные столбы), шар и др. Встречаются древовидные и кустообразные формы рудных тел, достигающие 3-4 м в высоту. Часто постройки формируют группы площадью до 100 м<sup>2</sup>. Помимо изометричных встречаются удлинённые (хребтообразные, линейные) залежи массивных сульфидных руд, образованные за счёт срастания «обычных» изометричных тел. Это крупные образования, достигающие сотен метров в длину. В качестве примера можно привести «рудный хребет» в рифтовой долине Галапагосского хребта, имеющий размеры 35\*20\*500 м, который представляет собой одну из наиболее крупных построек, известных в Мировом океане. На некоторых подводных горах и на краевых участках, перекрытых осадками приконтинентальных участках рифтовых долин встречаются тела плаще- и пластообразной формы, иногда как результат соединения рудных холмов (хр.Эндевор) (Краснов С.Г., Черкашев Г.А., Айнемер А.И., Гринталь Э.Ф. и др., 1992).



*Рисунок 2: отбор пробы с трубы «чёрного курильщика» (фото <https://oceanexplorer.noaa.gov>)*

В качестве важнейших полезных ископаемых океана наряду с массивными сульфидами «чёрных курильщиков» выступают металлоносные осадки, которые могут быть представлены как продуктами разрушения массивных отложений (латеральные и дистальные металлоносные осадки вблизи сульфидных построек), так и сформированными, и осаждёнными в придонной зоне над устьями высокотемпературных гидротермальных источников частицами песчано-алевритовой размерности. Мощность

металлоносных осадков обычно не превышает нескольких сантиметров, особенно вблизи «чёрных курильщиков» и в условиях активных придонных течений, однако площадь распространения может составлять многие десятки метров. Значительную роль в переносе осадков могут играть всплывающие и нейтральные гидротермальные плюмы, являющиеся вертикальными и горизонтальными потоками гидротермальных растворов в океанской воде. Такие потоки поднимаются на 100-400 (иногда 700 и более) метров над уровнем дна.

Благодаря своему гидротермальному происхождению руды обогащены Cu, Zn, Pb, Ag, Au, рядом редких химических элементов.

К настоящему времени известно до 50 районов распространения сульфидных руд в Мировом океане, находящиеся в пределах различных вулканически активных территорий, среди которых можно выделить срединно-океанические хребты, зоны внутриплитового вулканизма и зоны субдукции (включая активные задуговые бассейны, к которым относится рудный бассейн Манус).



Рисунок 3: диаграмма встречаемости гидротермальных полей в основных геодинамических обстановках (Fouquet et al., 1997)

### 1.1 Рудопроявления активных срединговых хребтов

Гидротермальные залежи в зоне активных срединговых хребтов приурочены к рифтам, система которых протянулась через все океаны Земли и является источником основной массы вулканических образований. Гидротермальные рудоносные растворы, из которых отлагаются сульфиды, могут быть приурочены к двум типам нагревателей – к неовулканической зоне внутреннего рифта с расположенной под ней на глубине 1-2 км близповерхностной магматической камерой с температурой, достигающей



1200°C (осевая гидротермальная циркуляционная система) и к области серпентинизации глубинных пород (глубинная гидротермальная система), расположенной за пределами внутреннего рифта или в трансформных разломах. Рудопроявления осевой гидротермальной системы, а именно их морфология и залегание, зависят от скорости спрединга в пределах хребта (менее 6 см/год на низкоспрединовых и от 6 до 18 см/год на высокоспрединовых). На низкоспрединовых хребтах гидротермальные отложения встречены в пределах внутреннего рифта, его неовулканической части и сводов (хребет Мона, северная часть Срединно-Атлантического хребта) и в связи с серпентинитовыми протрузиями (поле Логачева, 14°45 с.ш., поле Рэйнбоу, 36°14 с.ш., САХ). На высокоспрединовых хребтах они встречены в пределах неовулканических зон в осевых трогах или вулканических кальдерах, сформированных в результате опустошения магматических камер и проседания кровли (Богданов Ю.А., Лисицын А.П., Сагалевич А.М., Гурвич Е.Г., 2006).

Глубинные гидротермальные системы, связанные с областью серпентинизации пород, отличаются от осевых нетипичными свойствами флюида и составом гидротермальных образований, они могут располагаться на удалении от срединно-океанических хребтов, в регионах старой океанической коры, как это наблюдается на поле Лост Сити (Потерянный город). Оно было открыто в 2001 году на 30° Срединно-Атлантического хребта (САХ), в 15 км от оси спрединга, и находится на коре возрастом 1,5 млн.лет. Флюиды, вытекающие на поверхность в пределах поля, имеют низкие температуры (40°C-75°C) и рН до 9,8, а гидротермальные постройки имеют в основном карбонатный, а не сульфидный состав (P.E. Halbach, Y.Foquet, P.Herzig, 2001).

## **1.2 Рудопроявления зон внутриплитового вулканизма**

В зонах внутриплитового вулканизма гидротермальные рудопроявления проявлены не очень широко, и в основном они относятся к низкотемпературным отложениям. В качестве примера можно привести гидротермальные поля подводного вулкана Лоихи (Гавайи), поля внутриплитовых вулканов южной части Тихого океана. Неотъемлемой частью строения вулканов являются магматическая камера и подводящие каналы. Образующиеся в реакционной зоне над магматической камерой высокотемпературные гидротермальные растворы ( $T \approx 350^\circ\text{C}$ ) при подъёме к поверхности быстро смешиваются с проникающими по трещинам в теле вулкана придонными холодными океанскими водами, обладающими сильными окислительными свойствами, в результате остывают и обедняются гидротермальными химическими элементами. В связи с этим на поверхности вулканов можно наблюдать лишь низкотемпературные гидротермальные отложения, в то время как высокотемпературные отложения накапливаются в теле вулкана при миграции гидротермального раствора от реакционной зоны к поверхности (Богданов Ю.А., Лисицын А.П., Сагалевич А.М., Гурвич Е.Г., 2006).

## **1.3 Рудопроявления субдукционных зон**

Зоны субдукции являются вторыми по масштабности проявлений вулканизма и гидротермальной деятельности структурами Мирового океана после спрединговых хребтов и, в отличие от последних, в последние годы вызывают особый интерес у исследователей. В основе этого лежат два факта: во-первых, повышенные содержания таких элементов, как Pb, Au, Ag, некоторых редких элементов позволяют относить зоны субдукции к одним из наиболее перспективных в практическом плане территорий Мирового океана; во-вторых, многие исследователи рассматривают рудопроявления субдукционных участков в качестве аналогов многих древних колчеданных

месторождений континентального блока Земли. Пример зоны субдукции представлен на рис.4.

Её основными структурными элементами являются жёлоб, преддуговой склон, вулканическая дуга, задуговая область. В настоящее время наиболее полная информация известна о гидротермальных рудопроявлениях задуговых областей, к которым относится и бассейн Манус, включающий в себя группу месторождений S (Богданов Ю.А., Лисицын А.П., Сагалевич А.М., Гурвич Е.Г., 2006)

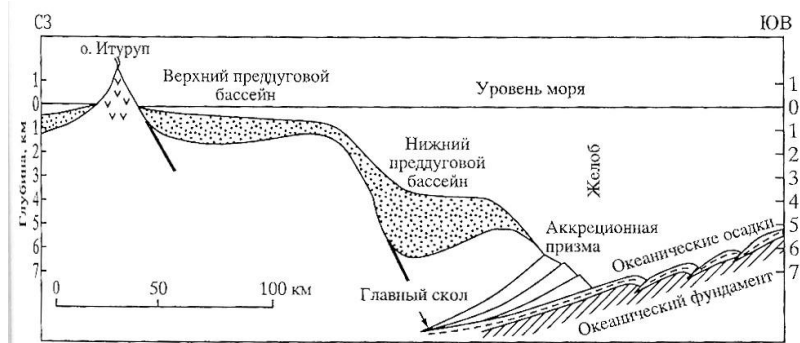


Рисунок 4: пример субдукционной зоны - разрез через Курильскую островную дугу (Зоннеништайн Л.П., Кузьмин М.И., 1992)

### 1.3.1 Рудопроявления активных задуговых бассейнов

По степени развития задуговые бассейны подразделяются на зарождающиеся (бассейны Окинава и Вудларк – начинающийся раскол континентальной коры; бассейн Лау, южная часть, – начинающийся раскол островодужной коры) и зрелые (Зоннеништайн Л.П., Кузьмин М.И., 1992). В случае раскола континентальной коры нередко проявлен бимодальный вулканизм (наряду с базальтами изливаются риолиты). В случае раскола островодужной коры широкое развитие имеют андезиты и дациты, связанные с поступлением водонасыщенной магмы, причем по мере раскрытия бассейнов и отодвигания центра спрединга от островной дуги вулканисты приближаются по составу к базальтам океанских рифтов и полностью переходят в них при превышении бассейном ширины в 350 километров. Массивные сульфидные руды могут испытывать влияние субдуцирующей плиты на расстояниях до 400 км от островной дуги. По мнению исследователей, на характер вулканизма и сопряженных с ним гидротермальных рудопроявлений могут влиять два фактора: степень

развития задуговых бассейнов и положение центра спрединга относительно субдуцирующей пластины. Нередко влияние и такого фактора, как скорость спрединга задугового центра.

Бассейн Манус, в который входит группа месторождений S, характеризуется высокими скоростями спрединга – до 12 см/год. Его исследование началось в 1986 году после публикации учёных Гавайского геофизического института о том, что в ходе экспедиции на судне «Моана Уэйв» было обнаружено гидротермальное поле во внутреннем рифте – в настоящее время поле «Ред стар» (Both R., Crook K., Taylor B. et al., 1986, Vol.67, N.21). А в 1991 году в восточной части бассейна Манус была открыта новая область с гидротермальным рудопроявлением, названная PACMANUS-I (Binns R.A., Scott S.D., 1993), в которую входит группа месторождений S.

## **2. МЕСТОРОЖДЕНИЕ S-1**

Информация о месторождении S-1 взята из отчета компании Nautilus Minerals.

### **2.1 Краткая характеристика**

S-1 относится к типу сульфидных гидротермальных месторождений задуговых бассейнов и входит в группу месторождений S рудного бассейна Манус в западной части Тихого океана. Месторождение представлено сульфидными рудами (массивными сульфидами пирит-халькопирит состава), в качестве полезных компонентов выделяют медь, цинк, золото и серебро (Lipton, 2012).

### **2.2 История открытия**

Изучение чёрных курильщиков и связанных с ними сульфидных руд на дне океана берёт своё начало в 1985 году, когда американским исследовательским судном Моана были сделаны первые фотоснимки дна на месте, где в настоящее время находится месторождение S-2. Публикация результатов этого исследования в 1986 году вызвала большой интерес в учёной среде. В последующее время внимание к сульфидным месторождениям в море Бисмарка росло, привлекая исследователей из Франции, Германии, Канады, Кореи, Японии, США, Австралии и Великобритании. Была проведена подробная батиметрия дна на участках нынешних м-й S-1,2,3,4, а также изучение территории с помощью глубоководных обитаемых аппаратов (ГОО) и буксировочных траверсов. По оценкам, с 1991 года научно-исследовательская организация стран содружества (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)) приобрела для исследований несколько тон сульфидных руд из

месторождения блока S. По данным экспедиций были составлены геологические карты рудных полей.

Гидротермальное поле S-1 было открыто CSIRO в 1996 во время третьей экспедиции PACMANUS-III по изучению восточных участков бассейна Манус, но его существование было предсказано ещё в 1993 году, во время второй экспедиции PACMANUS-II. Бурение на рудном поле S проводится начиная с 2000 года по программе океанского бурения (ODP - Ocean Drilling Program), а на S-1 с 2006 года компанией Nautilus. Всего на S-1 было реализовано 4 программы бурения – в 2006, 2007, 2008 и 2010/2011 годах (Lipton, 2012).

### 2.3 Физико-географическое положение и климатические условия

Месторождение сульфидных руд S-1 находится в западной части Тихого океана, в море Бисмарка, приблизительно 50 км севернее порта Рабаул (о.Новая Британия, Папуа-Новая Гвинея); имеет следующие координаты: 3.789 ю.ш., 152.094 в.д. Средняя глубина расположения рудных залежей – 1550 метров ниже уровня моря.

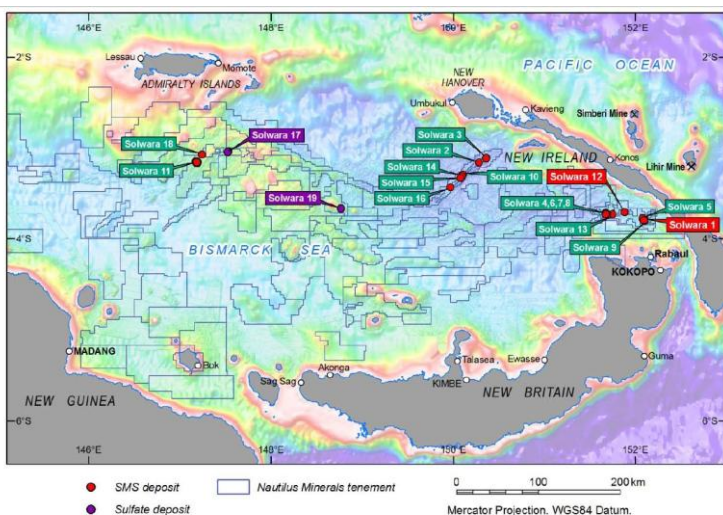


Рисунок 5: схема расположения гидротермальных полей рудного бассейна Манус (Lipton, 2012)

Климат в море Бисмарка тропический, что характеризуется высокими температурами (около 27-30°C) и повышенной влажностью (80-85%). S-1 находится за пределом пояса циклонов.

На территории активны два типа муссонов: летний - с ноября по апрель, имеет северо-западное направление, и зимний, с мая по октябрь, имеет юго-восточное направление; октябрь и апрель являются переходными

месяцами. Ветровые условия в море Бисмарка в целом благоприятные. Скорость ветра минимальна в переходные месяцы и составляет от 4,7 до 5,6 м/с, усиливаясь во время муссонов: зимнего - до 6,8-7,4 м/с и летнего - до 18,2-20,3 м/с. Шкваловые ветры скоростью до 30 м/с возможны практически в любой месяц года. Наиболее частой причиной образования подобных ветров являются грозные явления.

По волновым условиям территория также благоприятная: большую часть года здесь существуют обычные ветровые волны, зависящие от направления преобладающего в это время года муссона. Территория испытывает на себе приливно-отливное воздействие суточных и смешанных циклов, максимальная амплитуда приливов наблюдается весной и составляет 0,8 метра. Течения, проявленные на данной территории океана, имеют ветровую, приливно-отливную (смешанного цикла) и региональную природу. Для верхних 150 метров водной толщи большее значение имеет ветер: течения зависят от направления действия муссонов, имея восточную направленность летом и западную зимой. С глубины 200 и до 1300 метров течения становятся зависимы от цикла приливов и отливов (чередование W-WSW и E-ENE направлений) и преобладающего в этом месте регионального дрейфа вод, имеющего общую ориентировку на запад. Температура воды приповерхностного слоя на S-1 тёплая в течение всего года, испытывает незначительные вариации в зависимости от сезона. Так, в ноябре наблюдается максимум – 30.1°C, а в августе она опускается до 28.9°C. Придонные воды в течение всего года имеют температуру, близкую к 3°C.

S-1 находится на территории умеренно глубокого океана (с глубиной около 2000 метров), на которой расположены отдельные поднятия высотой до 700 метров. Два из них – Северный и Южный Су – вулканически активны (Lipton, 2012).

## 2.4 Геологическая позиция

**На региональном уровне:** расположенный в море Бисмарка бассейн Манус является задуговым бассейном, ограниченным с юга активной зоной субдукции Новобританского жёлоба и на севере неактивной зоной субдукции жёлоба Манус, образованным в зоне конвергенции между Австралийской плитой на юге и Тихоокеанской плитой на севере.

Бассейн включает в себя центры спрединга Манус (скорость спрединга примерно 10-12 см / год), в пределах которого расположены м-я S 2, 3, 10, 14, 15 и 16, и Willaumez, в пределах которого расположены S 11, 17 и 18, и рифтовую зону восточной части бассейна Манус, ограниченную двумя разломами западного и северо-западного направления (Djaul и Weitin). Восточная вулканическая зона расположена в восточной части бассейна Манус и содержит в себе м-я S 1, 4, 5, 7, 8, 9, 12 и 13 . Состав вулканитов варьируется от базальтового до дацитового.

Также на дне океана выделяется ряд вулканических построек, являющихся участками активной гидротермальной деятельности, с которой связано осаждение сульфидных руд. Nautilus Minerals определил семнадцать отдельных участков с массивным сульфидным оруденением в бассейне Манус и два участка, богатые баритом (S 17 и S 19), что вместе составляют проект S (Lipton, 2012).

**На локальном уровне:** м-е S-1 включено в вулканическую постройку северо-северо-западного простирания, расположенную на глубине около 1700 м ниже уровня океана среди пелагических осадков. Хребет имеет длину около 5 км и состоит в основном из базальта, на фоне которого выделяются два куполообразных участка андезит-дацитового состава – Северный и Южный Су, чьи вершины составляют 1.150 и 1.320 метров ниже уровня моря соответственно. М-е S-1 находится северо-северо-западнее Северного Су и лежит на пересечении с соседней рифтовой структурой северо-восточного



простирается (Bugave Ridge), состоящей в основном из базальтовых лав. Поле S-1 находится примерно на 1,520 м ниже уровня моря (Lipton, 2012).

## 2.5 Геология месторождения S-1:

Территория, на которой находится S-1, содержит ограниченные по площади выходы базальтов, андезитов и дацитов, окружённые осадочным чехлом. Само месторождение представляет собой область массивной (>50%) сульфидной минерализации, располагающуюся на вулканическом поднятии хребтообразной формы на 150-200 метров превышающем поверхность окружающего дна. Поднятие имеет крутые склоны (до 30°), однако у гребней хребтов есть пологие участки, на которых расположена большая часть месторождения. Участки хребта, прилегающие к S-1, по составу отвечают андезит-дацитовому вулканизму. На восточном и северном участках S-1 представлены дайки, сложенные дацитом.

Основная площадь месторождения S-1 содержит гидротермальные трубы, сложенные сульфидами – пиритом и халькопиритом, с примесью сфалерита и сульфатов – барита и ангидрита. В высоту трубы составляют от 2 до 10 метров, наиболее массивные разности – до 15 метров. Иногда они объединяются в линейные структуры, которые приурочены к местам наибольшей гидротермальной активности. Геологическое строение участка S-1 было определено с помощью алмазного бурения, максимальная глубина которого составила 51,62 метра. Литологические типы пород показаны в таблице 1.

Большая часть дна покрыта неконсолированными осадками (литологический код SS), представленными тёмно-серыми глинами и илами мощностью в среднем 1.94 метра (минимум составляет 0 метров, максимум - 5,62 метра) с примесью песчано-гравийного материала. Неконсолированные осадки подстилаются консолированными

отложениями (литологический код SC), сцементированными опалом, скрытокристаллическими или мелкозернистыми сульфидами и сульфатами. В этом слое могут встречаться ихнофоссилии, в основном ходы червей в открытом или заполненном виде, а также фрагменты оболочки брюхоногих моллюсков, замещенные сульфидами. Под консолидированными осадками выделяются три области сульфидной минерализации (наземные гидротермальные трубы рассматриваются отдельно) (Lipton, 2012):

- 1) Рудные осадочные породы (литологический код PT), представленные мелко- и среднезернистыми вулканокластическими консолидированными песками серого цвета мощностью в среднем 1.1 метр (максимум 6 метров). По мнению исследователей, осадки испытали влияние гидротермальных растворов, что послужило образованию опалового цемента, а также сульфидных и сульфатных минералов. В слое встречаются редкие фрагменты богатых сульфидами гидротермальных труб. Локально в слое проявлены участки значительной сульфидной минерализации, представленной халькопиритом и сфалеритом.
- 2) Массивные сульфиды внутренней и внешней зон (литологический код RI и литологический код CF) – главные области минерализации в разрезе. Мощность слоя варьирует от 0 метров до 29 метров в максимуме. Минерализация представлена пиритом и халькопиритом. Халькопирит наблюдается выше к поверхности, вокруг каналов и трубок, с глубиной сменяется пиритом. Присутствуют небольшие содержания сульфатных минералов – ангидрита и барита.
- 3) Зона вкрапленного сульфидного оруденения и гидротермально-изменённые вулканические породы (литологический код RC и RA): сильно изменённые вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы с практически отсутствующей первичной текстурой.

Сульфиды (пирит и в меньшей степени халькопирит) и сульфаты (барит, ангидрит) представлены в виде жил и мелкой вкрапленности в породе. Также могут быть встречены смектиты, опал и слюды (мусковит, парагонит, иллит), пирофиллит.

Месторождение S-1 состоит из восьми рудных тел, которые принадлежат одной системе минерализации. Геологически центральный, западный и восточный участки имеют сильное сходство. Северная зона расположена на периферии основной минерализации месторождения, для неё характерны скопления неактивных гидротермальных труб, расположенные на склоне хребта. Окружающая область заполнена осадками. Бурение на участках проводилось дважды – в 2008 и 2010/2011 годах.

В ходе бурения были получены следующие данные: осадочный чехол мощностью около 1.3 метра покрывает тонкую зону минерализации, представленную сфалеритом, галенитом и золотом в ассоциации с баритом и ангидритом. Подстилают этот слой массивные сульфидные руды, встречающиеся на глубинах до 15,89 метров – халькопирит, пирит, в меньшей степени сфалерит и галенит. Вторая обширная зона сульфидной минерализации встречена на 17-20 метров ниже морского дна. Две зоны разделены вулканитами (Lipton, 2012).

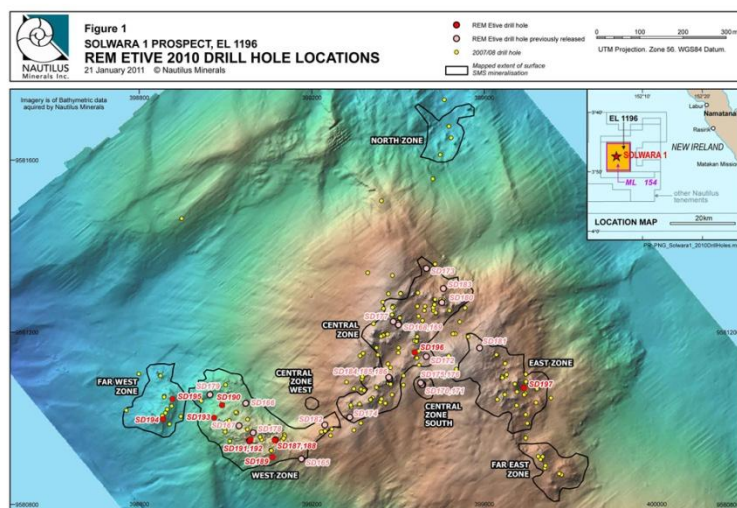


Рисунок 6: схема расположения рудных тел месторождения S-1 с результатами программы бурения 2010-2011 гг. (Lipton, 2012)

### **3. ХАРАКТЕРИСТИКА ФАКТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА**

Фактический материал для работы предоставлен Nautilus Minerals, ФГБУ «ВНИИОкеангеология» и включает в себя геохимические данные по составу пород и руд (400 проб), описания кернового материала (37 скважин), образцы керна (150 образцов), из них изготовлены плоские полированные шлифы (9 шт.), аншлифы (16 шт.) и шайбы (10 шт.).

Для дальнейшего анализа распределения основных и редких элементов в пределах рудных тел были построены разрез через скважины (см. приложение 1). На разрезах наблюдаются все типы породно-рудных комплексов, как осадочного, гидротермального, так и вулканического генезиса. На основе данных о составе керна скважин Nautilus Minerals была составлена колонка типов породно-рудных комплексов, описание которой было дано в предыдущей главе, а также в главе «Минералогическая характеристика рудного поля S-1» (см.табл.1). По результатам исследований, описанных ниже, были внесены изменения в колонку (см.табл.2).

## 4. МЕТОДИКА

Элементный химический анализ кернa, проводимый Nautilus Minerals в 2011 году, осуществлялся на базе лаборатории «SGS Australia Pty Ltd». Содержания элементов определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS). Содержания главных рудных элементов – Cu, Ag, Pb, Zn – были найдены с помощью оптической эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-OES). Золото исследовалось отдельно методом пламенной атомно-абсорбционной спектрофотометрии (AAS).

ICP-OES – высокочувствительный метод, позволяющий определять малые концентрации элементов (до  $10^{-10}\%$ ), в котором в качестве источника ионов используется индуктивно-связанная плазма. Проба переводится в газовую фазу, атомизируется и ионизируется с последующим возбуждением ионов и регистрацией спектра. Содержания элементов находятся с помощью предварительно установленных градуировочных зависимостей.

Пламенная AAS – высокочувствительный метод, позволяющий получить содержания почти 70 элементов Периодической таблицы по спектрам поглощения (однако по процедуре проведения – одноэлементный). Прибором для AAS служит атомно-абсорбционный спектрометр, основными элементами которого являются источник света, пламенный атомизатор, спектральный прибор и электронная система. Определение содержания элемента в пробе проводят с использованием экспериментально установленной функциональной зависимости между аналитическим сигналом и концентрацией элемента в градуировочном растворе.

Минералогическое описание образцов было проведено на оборудовании ИНоЗ СПбГУ (Polam, каф.ГМПИ; Leica, каф. минералогии) и

ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга ВНИИОкеангеология» (Zeiss). Использовался метод оптической рудной микроскопии.

Электронная микроскопия и микрозондовый анализ проводились на оборудовании ресурсного центра «Геомодель» - подразделения Научного парка СПбГУ (Сканирующий электронный микроскоп Hitachi S-3400n).

Рентгенофазовый анализ был осуществлён в ресурсном центре «Рентгенодифракционные методы исследования» - подразделения Научного парка СПбГУ (дифрактометры Rigaku MiniFlex II, съёмка велась на кобальтовом аноде).

## 5. МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РУДНОГО ПОЛЯ S-1

Выводы по минералогии сульфидного рудного поля S-1 были основаны на данных макро- и микроскопического описания образцов керна. В разделе «Геология месторождения S-1» была приведена стратиграфическая колонка породно-рудных комплексов, выделенная специалистами «Nautilus Minerals». В графическом варианте она представлена в таблице 1. Все выделенные горизонты пород и руд включены в три большие группы в зависимости от их генезиса – осадочные образования, гидротермально-изменённые породы и руды и материнские породы, в том числе брекчированные. Краткое описание каждого типа приведено в таблице 1. Однако в результате изучения образцов керна и работы с банком данных химического анализа была выявлена необходимость создания новой колонки, которая представлена в таблице 2. Согласно этой колонке, выделяются следующие группы пород и руд (снизу вверх по разрезу): материнские породы различной степени гидротермального преобразования – от неизменённых базальтов к сульфатизированным, уже претерпевшим значительную переработку; массивные сульфидные руды внутренней и внешней зон, различающиеся по химическому и минеральному составу (первые два рудных горизонта); цинк-баритовые руды (третий рудный горизонт); неконсолидированные осадки, в т.ч. металлоносные.

Ниже рассмотрены особенности минерального состава каждого типа пород и руд, особое внимание уделено рудным горизонтам. Следует отметить, что самый верхний тип пород - неконсолидированные осадки – не изучался в данной работе в связи с отсутствием образцов кернового материала.

Таблица 1: типы пород и руд на S-1 по данным отчёта Nautilus Minerals

Осадочные породы	Неконсолидированные осадки	SS	Неконсолидированные и слабо консолидированные осадки. Представлены глинистым, илестым, песчано-гравийным материалом. Встречаются обломки сульфидных построек.	
	Консолидированные осадки	SC	Осадочный материал, сцементированный скрытокристаллическими или мелкозернистыми сульфидами, сульфатами или опалом. Может содержать заполненные или открытые норы червя и фрагменты обломки брехионогих моллюсков, замещенные сульфидами.	
	Рудосодержащие осадки	PT	Мелко- и среднезернистые консолидированные песчаные осадки с опаловым, сульфидным или сульфатным цементом. Не содержит замещающих биогенных остатков и следов жизнедеятельности организмов. Встречаются редкие фрагменты гидротермальных труб.	
Гидротермально-изменённые породы и руды	Массивные сульфиды наружной зоны	CF	Подобный внешний вид и строение имеют внешние гидротермы. Определяющее значение имеет зональность сульфидов вокруг открытых каналов. Проводящие каналы находятся обычно в верхней части массивных сульфидов внутренней зоны (RI), однако их корневые части могут простираются на большую глубину.	
	Массивные сульфиды внутренней зоны	RI	Отсутствуют реликтовые текстуры, указывающие на вулканогенное или осадочное происхождение пород. Нет каналов с зональным расположением сульфидов, как в массивных сульфидах наружной зоны (CF).	Общий процент сульфидов в породе значительно превосходит совместное содержание сульфатной и глинистой компоненты. Из сульфидов преобладает пирит, из сульфатов – ангидрит.
	Вкрапленное сульфидное оруденение	RA	Содержание сульфатных минералов преобладает над сульфидной и глинистой составляющей. Сульфаты представлены в основном ангидритом, но могут включать и барит, сульфиды представлены пиритом и халькопиритом. Обычно подстилает основную зону минерализации, но может встречаться и на периферических участках гидротермальных труб	
	Гидротермально-изменённые вулканические породы	RC	Присутствуют жилы сульфатных минералов, в основном, ангидрита.	Преобладает глинистая составляющая (нонтронит, монтмориллонит). Из сульфатных минералов встречаются ангидрит и барит, из сульфидных – пирит и халькопирит. Обычно подстилает основную зону минерализации, но может встречаться и на периферических участках гидротермальных труб
Вулканогенные породы	Вулканокластическая брекчия	VB	Брекчия представлена плотноупакованными крупными обломками вулканического материала, почти не содержит матрикса. Может быть сильно изменена, но сохраняя текстурные особенности, указывающие на вулканическое происхождение.	
	Массивные вулканыты	VC	Тёмные, стекловатые или скрытокристаллические породы. Могут быть сильно изменены, но сохраняют текстурные особенности, указывающие на вулканическое происхождение.	

Таблица 2: типы пород и руд на S-1, выделенная на основе изучения керна

осадки	неконсолидированные осадки	1	Несцементированные и слабосцементированные осадки. Представлены илестым, глинистым или песчано-гравийным материалом. Встречаются обломки гидротермальных труб.	
	областерит-барит-кремнисто-гидротермальные отложения	2	Плотносцементированная мелкозернистая порода пятнистой текстуры тёмного оттенка. Преобладающие минералы - сфалерит, галенит, барит, опал, халькопирит и пирит. В верхних частях слоя могут быть обнаружены ихнофоссилии в виде нор червя, частично или полностью заполненные сульфидами.	
Zn-баритовая руда	массивные сульфиды внешней зоны	3	Имеют вид, схожий с внешними гидротермами. Плотная мелкозернистая порода, часто образование натёчных агрегатов. Имеет тёмно-серый и чёрный цвет. Преобладающие минералы - пирит, халькопирит. Отличительный признак - зональное расположение сульфидов внутри каналов.	
		4	Плотная, массивная мелкозернистая порода, целиком состоящая из сульфидов. Преобладающее значение имеет пирит, также встречаются такие минералы, как халькопирит и марказит.	
Cu руды	массивные сульфиды внутренней зоны	4		
	сульфатизированные изменённые базальты	5	Мелко- и среднезернистая порода массивной и реже пятнистой текстуры серого и светло-серого оттенков. Преобладающие минералы - сульфаты - ангидрит и в меньшей степени барит. Также присутствуют минералы глины (монтмориллонит, каолинит) и сульфиды (пирит, халькопирит) в незначительных количествах.	
вулканыты различного преобразования гидротермального	низкозернистые базальты	6	Мелко- и среднезернистая порода светло-серого и белого оттенков. Преобладают минералы глины (каолинит, монтмориллонит), также встречаются сульфаты и сульфиды, представленные отдельными кристаллами пирита и халькопирита.	
	вулканокластическая брекчия	7	Плотнупакованные обломки вулканического материала, практически без матрикса. Может быть сильно изменена и похожа на т.б	
	низкозернистые базальты	8	Плотная тёмная стекловатая или скрытокристаллическая порода, сложенная оливином, клинопироксенами, плагиоклазами, а также ортопироксеном и роговой обманкой.	

Вмещающие породы представлены базальтами и базальтовой брекчией. Это тёмная массивная или скрытокристаллическая порода с большой плотностью (2,6-3,11 г/см<sup>3</sup>). Минеральный состав - оливин, клинопироксен (авгит), полевой шпат (плагиоклаз), амфибол (роговая обманка), ортопироксен (Lipton, 2012).

Изменённые базальты и сульфатизированные изменённые базальты представляют собой продукты глубокой гидротермальной переработки материнских толщ. При реакциях с морской водой стекло и минералы базальтов замещаются глинистыми минералами, такими как селадонит и нонтронит (а также каолинит и монтмориллонит). Наряду с глинами по



породам развиваются железистые гидрослюды, смектиты и гидрооксиды, что в совокупности придаёт породе светлый оттенок (белый, светло-серый цвет) и очень низкую твёрдость. Рудное вещество в данных породах представлено редкими единичными кристаллами пирита, количество которых увеличивается вверх по разрезу. Кристаллы имеют размерность до 1-2 мм, идеальную кубическую форму и характерную штриховку на гранях. Сульфаты представлены ангидритом, который формирует массивные тела, а также встречается в виде белых с серым и светло-голубым оттенком кристаллов толстотаблитчатого или призматического облика. Массивный ангидрит (т.н. «ангидритовое ядро») является индикатором современной гидротермальной активности, поскольку, в отличие от других сульфатов, ему свойственна «ретроградная растворимость» при достижении температур ниже 170-150°C.

Над изменёнными базальтами залегают собственно рудные горизонты. Вкрапленное сульфидное оруденение встречается уже в нижележащих толщах в небольшом количестве, возрастая вверх по разрезу, что является следствием постепенной разгрузки флюида при движении вверх, к области контакта с холодной морской водой - главному геохимическому барьеру.

Массивные сульфиды пирит-марказит-халькопиритового состава формируют два рудных горизонта – внешнюю и внутреннюю зону минерализации. Их различие составляют в первую очередь минеральный состав, во вторую очередь – структурно-текстурные особенности отложений.

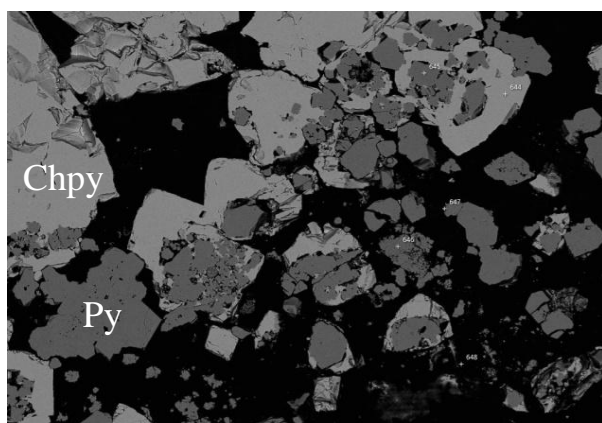
#### Массивные сульфиды внутренней зоны

Горизонт массивных сульфидов внутренней зоны по данным бурения встречается разных глубинах, от первых метров до 30-40 м ниже уровня океанского дна, и имеет наибольшую мощность из всех рудных горизонтов месторождения. Это главный материал, слагающий рудные холмы.

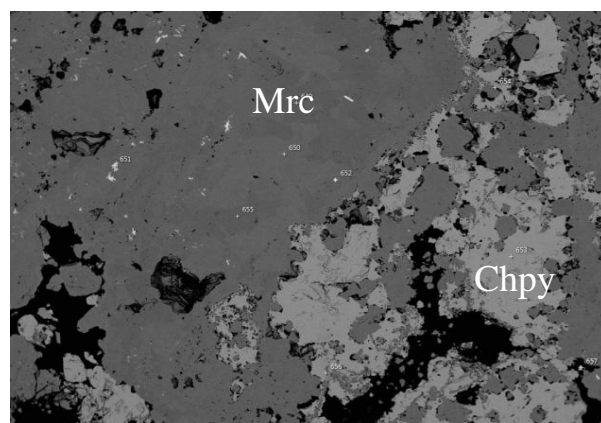
Массивные сульфиды внутренней зоны состоят преимущественно целиком из пирита и халькопирита; марказит и другие сульфидные фазы встречаются в подчинённом количестве. Пирит образует хорошо различимые кристаллы размером до 1 мм с характерной штриховкой по граням куба, иногда фрамбоиды, в верхних частях горизонта частично замещён марказитом как более низкотемпературной разностью. Халькопирит встречается в виде кристаллов псевдооктаэдрической или тетрагональной формы, в т.ч. сдвойникованной, а также в виде скрытокристаллических масс. В виде зёрен возможны проявления сфалерита, блёклых руд, барита, особенно на небольших глубинах. В нижних частях горизонта сульфиды сцементированы сульфатами (ангидритом). Текстуры массивные, местами пористые, вдоль пор наблюдается минеральная зональность.



*Рисунок 7: внешний вид массивных сульфидов внутренней зоны (обр. Ц-10-3,00)*



*Рисунок 8: минералогия массивных сульфидов внутренней зоны, электронная микроскопия (обр.Ц-5-28,32); Chpy-халькопирит, Py-пирит*



*Рисунок 9: минералогия массивных сульфидов внутренней зоны, электронная микроскопия (обр.Ц-10-3,00); Chpy-халькопирит, Mrc-марказит*

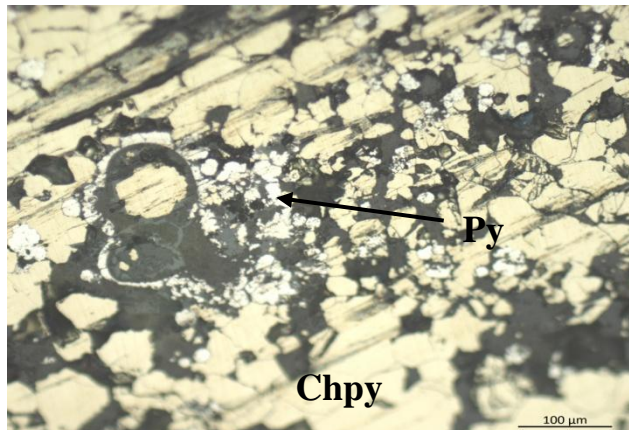
## Массивные сульфиды внешней зоны

Массивные сульфиды внешней зоны – плотные мелко- и скрытокристаллические породы тёмных оттенков (от серого до грязно-жёлтого). Основным минералом является халькопирит, занимающий до 90% объема породы.

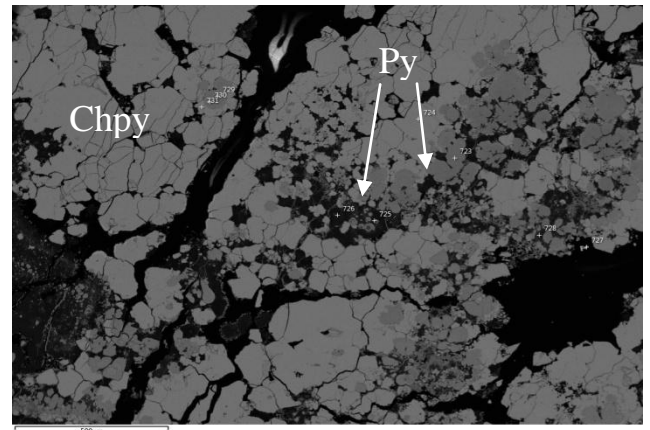
Второстепенными минералами являются блёклые руды, сфалерит и пирит в виде натёчных агрегатов, фрамбоидов и концентрических образований. Характерный отличительный признак массивных сульфидов внешней зоны – зональное расположение минералов вокруг каналов и пор, подобное тому, какое имеют сульфидные трубы «чёрных курильщиков». Как можно видеть по результатам оптической рудной микроскопии (см.рис.11), чаще всего вокруг каналов располагается пирит, как наиболее высокотемпературный минерал данной ассоциации.



*Рисунок 10: внешний вид массивных сульфидов внешней зоны (обр. 3-1-2,50)*



*Рисунок 11: минералогия массивных сульфидов внешней зоны, рудная оптическая микроскопия (обр.Ц-1-2,50);  
Chpy-халькопирит, Py-пирит*



*Рисунок 12: минералогия массивных сульфидов внешней зоны, электронная микроскопия (обр.Ц-1-2,50);  
Chpy-халькопирит, Py-пирит*

## Сфалерит-барит-кремнистый рудный горизонт

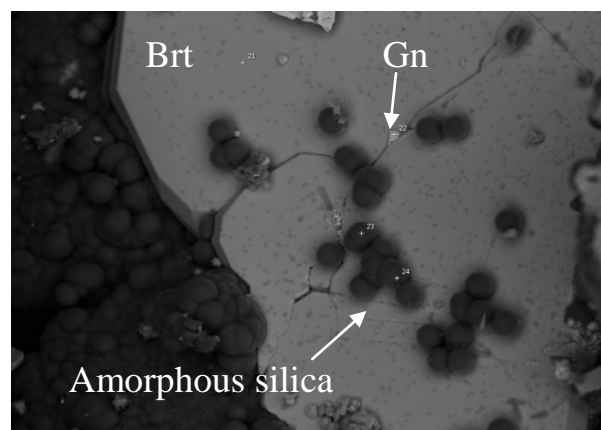
Данный горизонт является самым богатым по минеральному составу, он содержит большинство полиметаллов (сульфиды Zn, Pb, As, Sb, Cu, Cd, Hg, а также Au, Ag, образующиеся в заключительную стадию гидротермального процесса), в большом количестве встречаются сульфаты, в основном барит, в виде тонких ромбических пластинок (см.рис.14, рис.19). Сами руды имеют тёмный, почти чёрный оттенок, часто пятнистую текстуру и большую твёрдость, поскольку сцементированы аморфным кремнезёмом (опалом). Опал образует сфероидальные и почковидные агрегаты размером 5-10 микрон (см.рис.15).



*Рисунок 13: внешний вид руд сфалерит-барит-кремнистого рудного горизонта (обр. ЮЦ-3-3,75)*



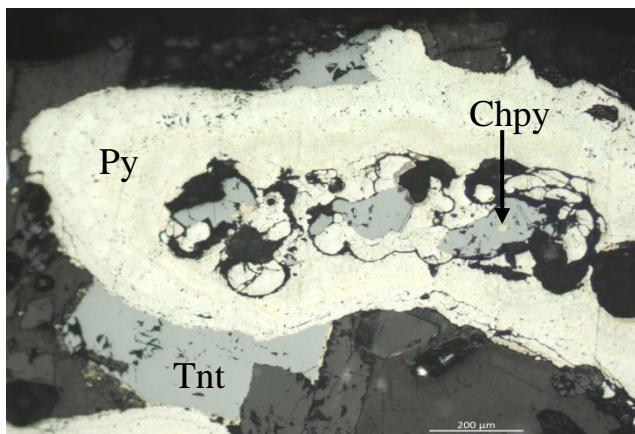
*Рис.14: пластинки барита в сфалерит-барит-кремнистом рудном горизонте, электронная микроскопия (обр.В-2-4,15)*



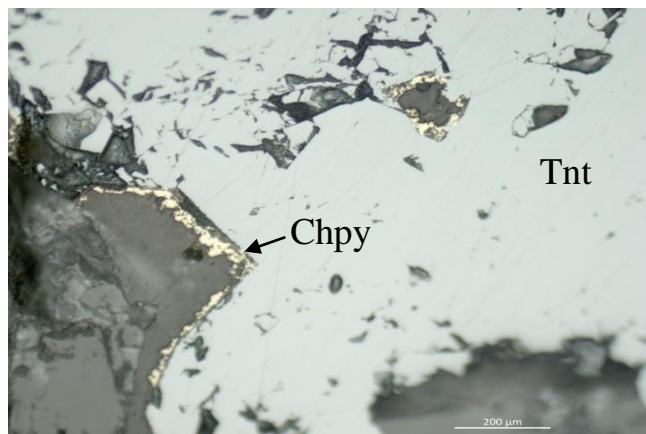
*Рис.15: сфероидальный опал в Zn-баритовом рудном горизонте, электронная микроскопия (обр.В-2-4,15);  
Brt – барит, Gn – галенит*

Наряду с пиритом и халькопиритом значительную часть объёма рудных отложений занимают блёклые руды – теннантит  $\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$  и и реже тетраэдрит  $\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ , характеризующиеся широкими вариациями составов

внутри изоморфного ряда и значительным количеством примесей, среди которых медь, железо, цинк, свинец и серебро (см.табл.7-10).



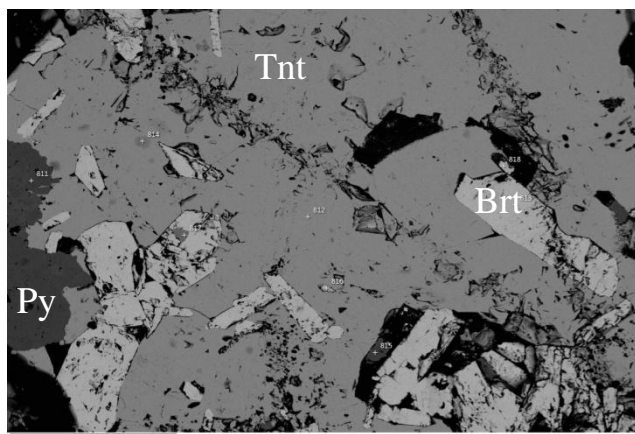
*Рисунок 16: минералогия руд сфалерит-барит-кремнистого горизонта, рудная оптическая микроскопия (обр.ЮЦ-3-2,50); Chpy-халькопирит, Py-пирит, Tnt-теннантит*



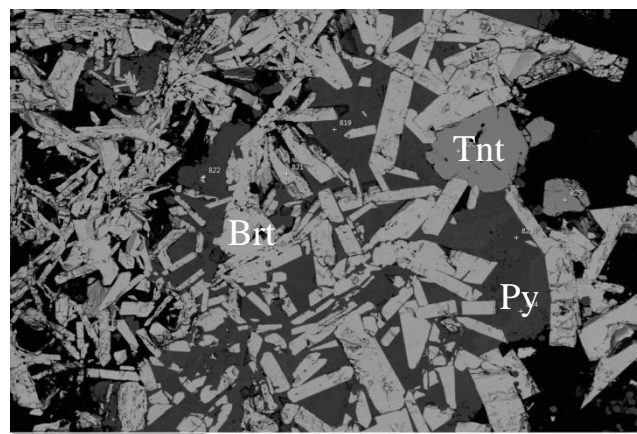
*Рисунок 17: минералогия руд сфалерит-барит-кремнистого горизонта, рудная оптическая микроскопия (обр.ЮЦ-3-2,50); Chpy-халькопирит, Tnt-теннантит*

В образце блёклые руды практически не образуют кристаллических форм, встречаются в виде сплошных и зернистых масс (см.рис.16-17).

Нередко образуют сростки с халькопиритом.



*Рисунок 18: минералогия руд сфалерит-барит-кремнистого горизонта, электронная микроскопия (обр.ЮЦ-3-3,75); Brt-барит, Py-пирит, Tnt-теннантит*



*Рисунок 19: минералогия руд сфалерит-барит-кремнистого горизонта, электронная микроскопия (обр.ЮЦ-3-3,75); Brt-барит, Py-пирит, Tnt-теннантит*

Блѣклые руды – не единственные сульфидные минералы, в составе которых присутствуют медь и мышьяк. По данным рентгенофазового анализа, который проводился для уточнения минерального состава верхнего рудного горизонта, было выявлено наличие такой фазы, как энаргит  $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ . В образце этот минерал проявлен в виде небольших (первые мм) столбчатых с вертикальной штриховкой кристаллов железно-чѣрного цвета с металлическим блеском. Следует отметить, что по химическому составу (масс.%) энаргит почти не отличается от теннантита.

Таблица 3: результаты рентгенофазового анализа обр. ЮЦ-3-3,75

№	2-theta(deg)	d(ang.)	Phase name	Chemical formula	Rel. height(a.u.)
1	15.937(6)	6.452(2)	Enargite(1,0,0)	$\text{Cu}_3\text{AsS}_4$	0.93
2	21.228(5)	4.8563(12)	Enargite(1,1,0)	$\text{Cu}_3\text{AsS}_4$	2.15
3	21.784(9)	4.734(2)	Enargite(0,1,1)	$\text{Cu}_3\text{AsS}_4$	0.60
4	32.328(2)	3.2131(2)	Enargite(2,0,0)	$\text{Cu}_3\text{AsS}_4$	100.00
5	33.147(14)	3.1359(13)	Pyrite(1,1,1)	$\text{FeS}_2$	0.84
6	33.798(4)	3.0772(4)	Enargite(0,0,2)	$\text{Cu}_3\text{AsS}_4$	20.96
7	35.354(8)	2.9458(6)	Enargite(2,1,0)	$\text{Cu}_3\text{AsS}_4$	2.32
8	36.6047(19)	2.84838(14)	Enargite(1,2,1)	$\text{Cu}_3\text{AsS}_4$	58.33
9	38.545(3)	2.7100(2)	Pyrite(2,0,0)	$\text{FeS}_2$	5.68
10	39.24(2)	2.6637(14)	Enargite(2,1,1)	$\text{Cu}_3\text{AsS}_4$	0.43
11	43.302(2)	2.42441(12)	Enargite(2,2,0),Pyr	$\text{Cu}_3\text{AsS}_4, \text{FeS}_2$	3.93
12	46.630(11)	2.2600(5)	Enargite(2,2,1)	$\text{Cu}_3\text{AsS}_4$	0.42
13	47.466(3)	2.22247(11)	Enargite(1,2,2)	$\text{Cu}_3\text{AsS}_4$	8.51
14	47.671(3)	2.21345(13)	Pyrite(2,1,1)	$\text{FeS}_2$	2.87
15	51.445(10)	2.0610(4)	Enargite(3,1,0)	$\text{Cu}_3\text{AsS}_4$	0.51

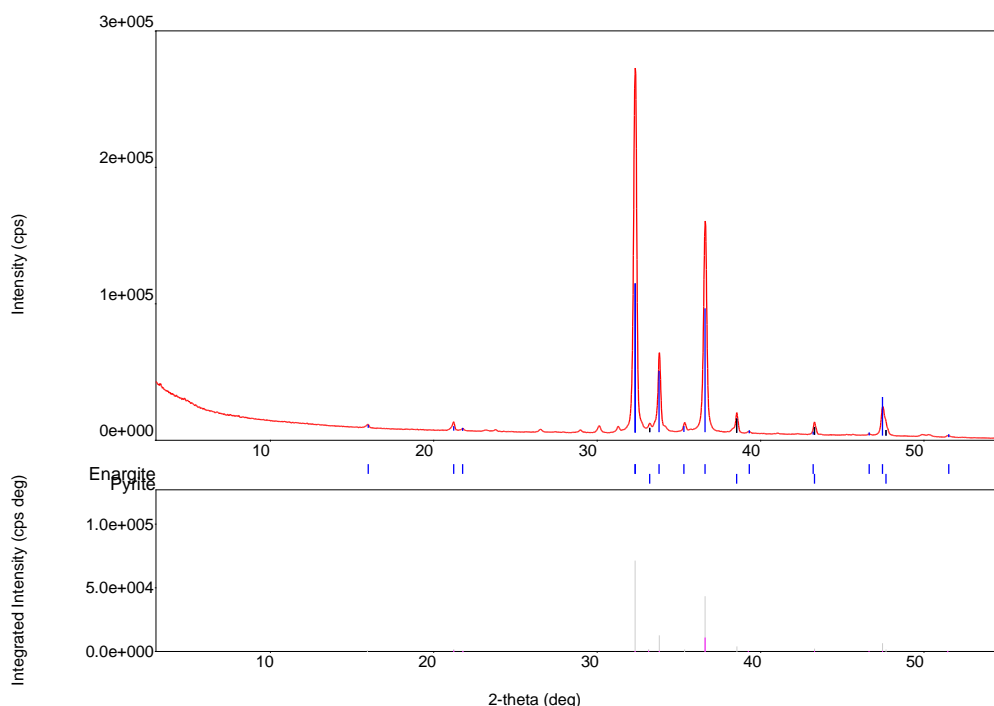


Рисунок 20:  
рентгенограмма  
обр. ЮЦ-3-3,75;  
Наиболее  
интенсивные пики  
соответствуют  
энаргиту, менее  
интенсивные -  
пириту

Сфалерит-барит-кремнистый рудный горизонт, ввиду своего расположения, более подвержен окислительным процессам. В образцах проявлено разнообразие окисных, гидроокисных форм. Исследование химического состава главных минералов рудных горизонтов производилось с помощью электронного микроскопа с микрозондовой приставкой. Ниже приведены таблицы исходных данных в вес.% и таблицы коэффициентов для каждого минерала, сводные по трём горизонтам. Расчёт формул производился по количеству атомов серы.

### Пирит FeS<sub>2</sub>

По результатам микроанализа были выявлены основные примесные элементы в минерале – медь и мышьяк. Их присутствие в пирите может объясняться как результат изо- и гетеровалентного изоморфизма, а также наличия в минерале механических примесей в виде мельчайших включений посторонних Cu- и As-содержащих минералов в тонкодисперсном состоянии (кристаллозолей). Поскольку анализы брались в точках, максимально удалённых от границ зерна, влияние составов соседствующих минералов на спектры ограничено. Тем не менее наблюдается закономерность: если в образце присутствуют блёклые руды (в основном теннантит), значит, с большой вероятностью в пирите будет примесь мышьяка. Ниже представлена таблица с результатами микроанализа и посчитанными на их основе коэффициентами для 30 спектров.

*Таблица 4: химический состав пирита месторождения S-1 и его пересчёт на формульные коэффициенты (расчётная основа S=2,00)*

№	№ спектра	Fe	Cu	As	S	Fe	Cu	As	S
1	Спектр 519	45,73	1,41		52,86	0,99	0,01		2,00
2	Спектр 520	46,34	1,42		52,24	0,99	0,01		2,00
3	Спектр 528	46,34	1,53		52,13	0,98	0,02		2,00
4	Спектр 532	46,02	1,23		52,75	0,99	0,01		2,00
5	Спектр 534	45,29	1,47		53,24	0,99	0,01		2,00
6	Спектр 537	46,50	1,30		52,20	0,99	0,01		2,00
7	Спектр 540	46,22	1,37		52,41	0,99	0,01		2,00

Таблица 4 (продолжение): химический состав пирита месторождения S-1 и его пересчёт на формульные коэффициенты (расчётная основа S=2,00)

8	Спектр 544	45,83	1,58		52,59	0,98	0,02		2,00
9	Спектр 552	45,75	1,50		52,76	0,99	0,01		2,00
10	Спектр 553	45,06	2,39		52,54	0,97	0,03		2,00
11	Спектр 560	46,86		0,72	52,42	0,99		0,01	2,00
12	Спектр 567	46,84			53,16	1,00			2,00
13	Спектр 582	46,42		1,13	52,45	0,98		0,02	2,00
14	Спектр 583	46,22		0,96	52,82	0,98		0,02	2,00
15	Спектр 584	44,22	5,35		50,43	0,95	0,05		2,00
16	Спектр 592	46,91			53,09	1,00			2,00
17	Спектр 595	46,82			53,18	1,00			2,00
18	Спектр 597	45,60			52,40	1,00			2,00
19	Спектр 606	47,31			51,94	1,00			2,00
20	Спектр 620	47,34			52,66	1,00			2,00
21	Спектр 628	46,48			53,52	1,00			2,00
22	Спектр 630	46,44			53,56	1,00			2,00
23	Спектр 631	47,14			52,86	1,00			2,00
24	Спектр 633	46,88			53,12	1,00			2,00
25	Спектр 633	46,88			53,12	1,00			2,00
26	Спектр 637	46,89			53,11	1,00			2,00
27	Спектр 639	46,91			53,09	1,00			2,00
28	Спектр 641	46,74			52,03	1,00			2,00
29	Спектр 643	47,05			52,95	1,00			2,00
30	Спектр 645	46,53			53,47	1,00			2,00

### Халькопирит $\text{CuFeS}_2$

Для расчета коэффициентов в формуле халькопирита, как и для пирита, была произведена представительная выборка в 30 анализов. Следует отметить исключительную чистоту данного минерала – в нём не встречены никакие примеси, в отличие от всех остальных анализируемых сульфидных фаз. Коэффициенты для железа и меди несколько варьируют, но в целом отвечают идеальной формуле минерала.

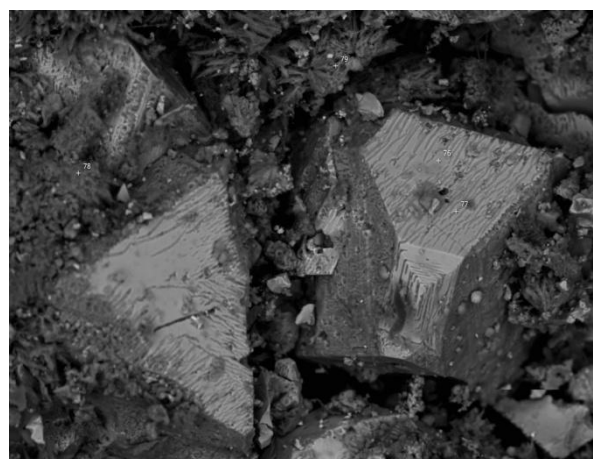


Рисунок 21: кристаллы халькопирита под электронным микроскопом (обр.3-1-2,50)



Таблица 5: химический состав халькопирита месторождения S-1 и его пересчёт на формульные коэффициенты (расчётная основа S=2,00)

№	№ спектра	Cu	Fe	S	Cu	Fe	S
1	Спектр 518	33,79	30,54	35,67	0,97	1,03	2,00
2	Спектр 524	34,80	30,82	34,38	1,02	0,98	2,00
3	Спектр 529	34,76	30,49	34,75	1,01	0,99	2,00
4	Спектр 531	34,38	30,93	34,69	1,00	1,00	2,00
5	Спектр 536	34,68	30,44	34,89	1,00	1,00	2,00
6	Спектр 555	34,68	30,91	34,41	1,02	0,98	2,00
7	Спектр 580	34,88	30,59	34,52	1,02	0,98	2,00
8	Спектр 596	35,07	30,46	34,47	1,03	0,97	2,00
9	Спектр 604	34,43	30,96	34,61	1,00	1,00	2,00
10	Спектр 623	34,69	30,69	34,62	1,01	0,99	2,00
11	Спектр 627	34,57	30,72	34,71	1,01	0,99	2,00
12	Спектр 634	34,43	30,92	34,66	1,00	1,00	2,00
13	Спектр 636	32,81	31,64	35,55	0,94	1,06	2,00
14	Спектр 640	33,96	30,92	35,12	0,98	1,02	2,00
15	Спектр 644	34,25	30,88	34,88	0,99	1,01	2,00
16	Спектр 662	34,77	30,89	34,34	1,02	0,98	2,00
17	Спектр 667	33,84	31,92	34,23	1,00	1,00	2,00
18	Спектр 684	34,75	31,07	34,18	1,02	0,98	2,00
19	Спектр 686	33,94	31,35	34,71	0,99	1,01	2,00
20	Спектр 694	35,36	30,57	34,06	1,04	0,96	2,00
21	Спектр 696	34,14	30,16	35,70	0,98	1,02	2,00
22	Спектр 702	33,37	30,60	36,03	0,94	1,06	2,00
23	Спектр 710	34,65	30,18	35,17	0,99	1,01	2,00
24	Спектр 724	34,27	30,82	34,91	0,99	1,01	2,00
25	Спектр 731	34,43	30,68	34,90	1,00	1,00	2,00
26	Спектр 738	34,38	30,88	34,75	1,00	1,00	2,00
27	Спектр 744	34,09	30,76	35,15	0,98	1,02	2,00
28	Спектр 750	33,75	31,06	35,19	0,97	1,03	2,00
29	Спектр 761	34,92	30,62	34,46	1,02	0,98	2,00
30	Спектр 763	34,24	30,84	34,92	0,99	1,01	2,00

### Борнит $Cu_5FeS_4$

Наряду с халькопиритом в образцах встречается борнит, но в значительно меньших количествах. Как и в халькопирите, в минерале отсутствуют примеси, в целом, борнит отвечает формуле  $Cu_5FeS_4$ .

Таблица 6: химический состав борнита месторождения S-1 и его пересчёт на формульные коэффициенты (расчётная основа S=4,00)

№	№ спектра	Cu	Fe	S	Cu	Fe	S
1	Спектр 521	68,46	6,93	24,61	5,38	0,62	4,00
2	Спектр 522	61,19	11,79	25,72	4,95	1,05	4,00
3	Спектр 526	59,02	12,86	28,12	4,69	1,31	4,00
4	Спектр 533	60,33	12,73	26,93	4,91	1,09	4,00
5	Спектр 546	61,93	10,71	26,97	5,00	1,00	4,00

Блѣклая руда: теннантит и тетраэдрит  $Cu_{12}(As,Sb)_4S_{13}$

Результаты анализа блѣклых руд выявили чрезвычайную изменчивость составов этих минералов, начиная от соотношения количества сурьмы и мышьяка в структуре (группировка  $(As,Sb)S_3$ ) и заканчивая числом примесных элементов, занимающих позицию меди (внекаркасного катиона). Так примесь железа и цинка встречается в обоих минералах и достигает десяти масс.%. В тетраэдрите есть примесь свинца – первые масс.%, в теннантите этот элемент не встречается. Однако теннантит обогащён серебром, которое охотнее ассоциирует с сурьмой, чем с мышьяком, что заметно даже по спектрам теннантита (№№ 666, 673, 674, 679 – см. табл.5,6). В этих спектрах в минерале повышенное содержание сурьмы, что сопровождается наличием первых процентов Ag.

Таблица 7: химический состав теннантита месторождения S-1

№	№ спектра	Cu	Fe	Zn	Pb	Ag	As	Sb	S
1	Спектр 556	42,31	3,39	6,53			20,29		27,48
2	Спектр 558	42,85	3,32	5,33			20,69		27,82
3	Спектр 559	41,39	4,14	5,31			19,81	2,03	27,32
4	Спектр 561	42,26	5,06	4,56			19,86	0,83	27,43
5	Спектр 563	41,57	5,36	4,94			20,19		27,94
6	Спектр 564	42,33	5,75	4,77			19,78		27,37
7	Спектр 565	42,55	4,95	4,50			19,08	1,46	27,47
8	Спектр 566	42,57	4,82	4,85			20,31		27,46
9	Спектр 568	42,37	5,19	4,17			20,40		27,86
10	Спектр 569	39,45	3,44	6,86			21,85		28,40
11	Спектр 571	41,12	4,29	4,86	2,27		20,80		26,67
12	Спектр 573	41,86	4,81	4,82			19,26	1,53	27,72
13	Спектр 574	41,07	3,08	4,75	3,65		20,52		26,93
14	Спектр 575	42,54	4,76	4,62			20,26		27,82

Таблица 7 (продолжение): химический состав теннантита месторождения S-1

15	Спектр 576	42,25	4,75	4,38			20,94		27,68
16	Спектр 577	40,89	3,18	7,49			19,35	1,93	27,17
17	Спектр 578	41,96	5,61	4,24			19,64	1,12	27,43
18	Спектр 579	41,71	4,91	4,72			20,82		27,85
19	Спектр 581	42,92	4,64	4,09			20,47		27,88
20	Спектр 585	40,62	4,51	5,75			16,64	4,69	27,02
21	Спектр 586	41,98	4,50	4,80			20,62		28,10
22	Спектр 588	41,57	3,99	3,99	2,74		20,68		27,03
23	Спектр 589	41,67	5,54	4,93			19,76		28,11
24	Спектр 590	41,81	3,76	5,60			21,09		27,75
25	Спектр 594	40,93	3,35	6,75			17,71	3,79	27,48
26	Спектр 666	40,12	6,48	3,90		0,73	16,62	4,57	27,59
27	Спектр 673	37,23	8,44	3,96		1,24	15,26	6,26	27,60
28	Спектр 679	40,00	5,70	4,25		1,03	12,85	9,32	26,84

Таблица 8: пересчёт химического состава теннантита на формульные коэффициенты (расчётная основа S=13,00)

№	№ спектра	Cu	Fe	Zn	Pb	Ag	As	Sb	S
1	Спектр 556	9,90	0,75	1,36			3,96		13,00
2	Спектр 558	9,93	0,77	1,25			4,01		13,00
3	Спектр 559	9,94	0,99	1,28			3,50	0,36	13,00
4	Спектр 561	9,90	1,12	1,07			3,87	0,04	13,00
5	Спектр 563	9,56	1,23	1,14			3,91		13,00
6	Спектр 564	9,72	1,31	1,09			3,85		13,00
7	Спектр 565	9,87	1,15	1,06			3,61	0,29	13,00
8	Спектр 566	9,85	1,11	1,12			3,91		13,00
9	Спектр 568	9,78	1,20	0,96			3,97		13,00
10	Спектр 569	9,02	0,79	1,56			4,10		13,00
11	Спектр 571	9,30	0,98	1,10	0,51		3,84		13,00
12	Спектр 573	9,70	1,11	1,11			3,73	0,24	13,00
13	Спектр 574	9,29	0,70	1,06	0,83		3,86		13,00
14	Спектр 575	9,84	1,11	1,08			3,93		13,00
15	Спектр 576	9,71	1,10	1,01			4,04		13,00
16	Спектр 577	9,48	0,74	1,74			3,61	0,25	13,00
17	Спектр 578	9,73	1,29	0,98			3,69	0,22	13,00
18	Спектр 579	9,62	1,12	1,08			4,01		13,00
19	Спектр 581	10,00	1,08	0,95			4,00		13,00
20	Спектр 585	9,47	1,06	1,33			3,07	0,86	13,00
21	Спектр 586	9,79	1,04	1,11			3,99		13,00
22	Спектр 588	9,59	0,92	0,92	0,63		3,83		13,00
23	Спектр 589	9,44	1,27	1,13			3,92		13,00
24	Спектр 590	9,49	0,86	1,29			4,07		13,00
25	Спектр 594	9,18	0,75	1,51			3,37	0,71	13,00

Таблица 8 (продолжение): пересчёт химического состава теннантита на формульные коэффициенты (расчётная основа S=13,00)

26	Спектр 666	9,05	1,45	0,87		0,16	3,18	0,87	13,00
27	Спектр 673	8,22	1,86	0,86		0,26	2,85	1,16	13,00
28	Спектр 679	8,89	1,25	0,94		0,22	2,41	1,76	13,00

Таблица 9: химический состав тетраэдрита месторождения S-1

№	№ спектра	Cu	Fe	Zn	Ag	As	Sb	S
1	Спектр 665	36,32	5,05	4,06	1,81	5,31	22,57	24,88
2	Спектр 670	35,84	4,87	3,58	2,1	2,94	25,3	25,37
3	Спектр 678	38,25	4,73	4,44	1,51	3,62	23,22	24,22
4	Спектр 680	37,42	4,85	4,76	1,68	4,57	21,49	25,23
5	Спектр 682	36,1	5,03	4,25	1,24	7,37	19,16	26,84
6	Спектр 683	37,19	4,28	3,5	1,58	3,14	25,43	24,88

Таблица 10: пересчёт химического состава тетраэдрита на формульные коэффициенты (расчётная основа S=13,00)

№	№ спектра	Cu	Fe	Zn	Ag	As	Sb	S
1	Спектр 665	9,55	1,35	0,90	0,28	1,19	2,71	13,00
2	Спектр 670	9,47	1,26	0,88	0,57	0,45	3,45	13,00
3	Спектр 678	9,38	1,24	1,10	0,37	0,59	3,28	13,00
4	Спектр 680	9,70	1,26	1,18	0,44	0,72	2,96	13,00
5	Спектр 682	9,40	1,22	0,93	0,31	1,18	2,82	13,00
6	Спектр 683	9,81	1,12	0,92	0,40	0,43	3,50	13,00

### Сфалерит ZnS

Сфалерит встречается в гидротермах в основном в виде небольших зёрен размером  $n-10 \cdot n$  микрон в ассоциации с главными рудными минералами (пирит, халькопирит), что затрудняет получение качественных анализов без влияния фона. К главным примесным компонентам фона относятся железо и медь в количествах, содержания в анализе которых составляют первые единицы мас. %.

Таблица 11: химический состав сфалерита месторождения S-1 и его пересчёт на формульные коэффициенты (расчётная основа S=1,00)

№	№ спектра	Zn	Fe	Cu	S	Zn	Fe	Cu	S
1	Спектр 525	61,87	2,13	3,68	32,32	0,97	0,01	0,02	1,00
2	Спектр 530	60,60	3,20	3,21	32,99	0,96	0,02	0,02	1,00
3	Спектр 538	57,86	4,48	5,91	31,75	0,95	0,02	0,03	1,00
4	Спектр 614	65,23	0,98	0,92	32,87	1,00			1,00
5	Спектр 618	65,01	0,66	1,45	31,88	1,00			1,00
6	Спектр 659	54,75	9,00	3,76	32,50	0,90	0,09	0,01	1,00
7	Спектр 668	59,63	6,05	1,40	32,93	0,97	0,03		1,00
8	Спектр 734	61,26	3,26	2,08	33,39	0,97	0,02	0,01	1,00
9	Спектр 735	62,84	2,21	1,01	33,94	0,98	0,01		1,00
10	Спектр 741	63,75	1,86	1,12	33,27	0,99	0,01		1,00
11	Спектр 747	64,08	2,11		33,10	0,99	0,01		1,00
12	Спектр 748	62,78	1,88	1,15	34,19	1,00			1,00

### Галенит PbS

Несмотря на то, что третьему рудному горизонту (Zn-баритовой руде) соответствуют высокие концентрации свинца, галенит при макроскопическом описании и оптической рудной микроскопии диагностировать не удалось. При изучении минералов Zn-баритовой руды под электронным микроскопом было выявлено, что этот минерал встречается в виде октаэдрических кристаллов микронной размерности (5-20 микрон), чем объясняются трудности в обнаружении этого минерала при оптических исследованиях с меньшим увеличением (см.рис.23). В связи с маленьким размером кристаллов, а также с нахождением галенита в поверхностном рудном

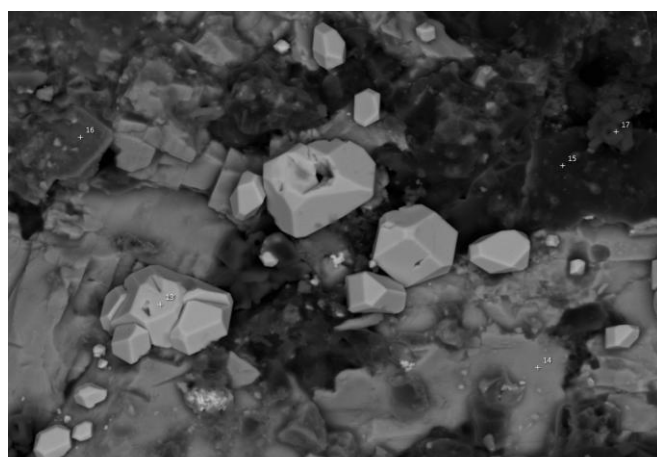


Рисунок 22: кристаллы галенита под электронным микроскопом (обр.В-2-4,15)

горизонте, получение приемлемых результатов химического анализа было затруднено, поскольку большинство спектров захватывали данные состава окружающих минералов (пирита, халькопирита, блёклых руд), также в большом количестве были встречены соединения с кислородом, в т.ч. оксо- и гидроксохлориды свинца.

Из восьми спектров для свинец-содержащего минерала формуле галенита отвечает один, приведённый ниже.

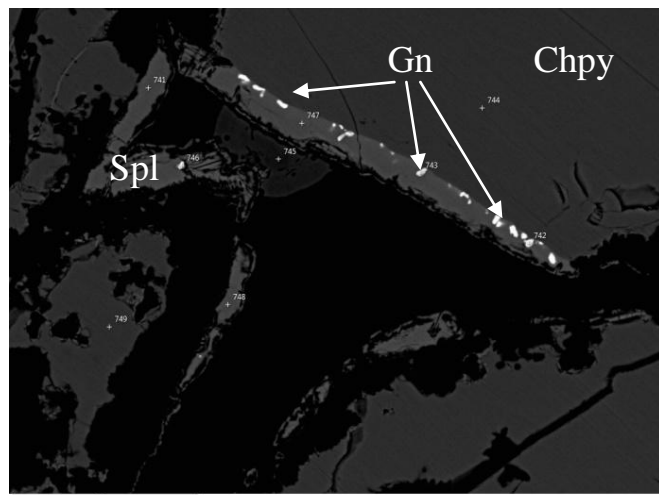


Рисунок 23: зёрна галенита под электронным микроскопом (обр.3-1-2,50); Spl-сфалерит, Chpy-халькопирит, Gn-галенит

Таблица 12: химический состав галенита месторождения S-1 и его пересчёт на формульные коэффициенты (расчётная основа S=1,00)

№	№ спектра	Pb	S	Pb	S
				1,00	1,00
1	Спектр 718	86,58	13,42		

## 6. ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

### РУДНОГО ПОЛЯ S-1

Геохимические особенности месторождения S-1 анализировались статистическими методами и включали в себя корреляционный, факторный анализы, которые выполнялись в программе STATISTICA. Помимо статистического анализа данных изучались распределения четырёх основных рудных компонентов – Cu, Zn, Pb, Au – по разрезам. Распределения были построены в программе Surfer на основе разрезов рудного тела «Западное» и совмещённого разреза рудных тел «Центральное» и «Западно-Центральное», поскольку они наиболее полно вскрыты скважинами.

Для выявления основных ассоциаций химических элементов был осуществлён корреляционный анализ. Следует отметить, что данные по корреляции, представленные в работе, были получены в результате анализа материала рудного тела «Западное», однако они справедливы для месторождения в целом и остальных рудных тел в частности. Анализ проводился по коэффициенту корреляции Пирсона, рассчитываемого по формуле  $r_{xy} = \frac{\sum(d_x * d_y)}{\sqrt{(\sum d_x^2 * d_y^2)}}$ , уровень значимости  $<0,05$  (вероятность ошибки составляет 5%). В результате исследования была получена таблица силы корреляции и найдены связи между главными рудными и редкими элементами.

Таблица 13: матрица парных корреляций между элементами

Примечание: красным цветом выделены сильные связи (коэффициент Пирсона >0,7)

	Al	As	Au	Ba	Bi	Ca	Cd	Co	Cu	Fe	Hg
Al	1,00	-0,50	-0,35	-0,20	-0,24	0,17	-0,27	-0,36	-0,52	-0,58	-0,20
As		1,00	0,35	0,27	0,02	-0,42	0,18	0,12	0,30	0,41	0,26
Au			1,00	0,33	0,10	-0,30	0,32	0,02	0,44	0,09	0,17
Ba				1,00	-0,13	-0,22	0,72	-0,27	-0,17	-0,33	0,77
Bi					1,00	-0,18	0,04	0,52	0,47	0,25	0,04
Ca						1,00	-0,24	-0,29	-0,43	-0,53	-0,18
Cd							1,00	-0,12	-0,03	-0,18	0,65
Co								1,00	0,54	0,56	-0,13
Cu									1,00	0,53	-0,08
Fe										1,00	-0,29
Hg											1,00
Mg											
Mo											
Ni											
Pb											
S											
Sb											
Se											
SiO2											
Te											
Zn											



Таблица 13 (продолжение): матрица парных корреляций между элементами

Примечание: красным цветом выделены сильные связи (коэффициент Пирсона >0,7)

	<b>Mg</b>	<b>Mo</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>S</b>	<b>Sb</b>	<b>Se</b>	<b>SiO2</b>	<b>Te</b>	<b>Zn</b>
<b>Al</b>	<b>0,81</b>	-0,42	0,52	-0,17	-0,73	-0,21	-0,21	<b>0,72</b>	-0,03	-0,20
<b>As</b>	-0,30	0,37	-0,23	0,18	0,39	0,22	0,03	-0,31	-0,14	0,15
<b>Au</b>	-0,23	0,12	-0,29	0,16	0,07	0,35	-0,07	-0,11	-0,13	0,29
<b>Ba</b>	-0,14	-0,24	-0,23	0,62	-0,25	<b>0,74</b>	-0,29	0,14	-0,16	<b>0,77</b>
<b>Bi</b>	-0,16	0,54	-0,36	0,07	0,19	-0,14	0,09	-0,17	0,10	0,01
<b>Ca</b>	0,12	-0,37	0,28	-0,15	-0,28	-0,17	-0,13	-0,07	0,07	-0,17
<b>Cd</b>	-0,18	0,03	-0,27	0,61	-0,12	0,51	-0,08	0,01	-0,12	0,97
<b>Co</b>	-0,29	0,69	-0,17	-0,04	0,50	-0,11	0,45	-0,36	0,23	-0,18
<b>Cu</b>	-0,36	0,63	-0,42	-0,03	0,44	0,02	0,32	-0,40	-0,06	-0,11
<b>Fe</b>	-0,44	0,57	-0,27	-0,24	<b>0,92</b>	-0,26	0,32	-0,67	0,13	-0,30
<b>Hg</b>	-0,13	-0,08	-0,27	<b>0,87</b>	-0,22	<b>0,84</b>	-0,13	0,15	-0,13	<b>0,72</b>
<b>Mg</b>	<b>1,00</b>	-0,27	0,46	-0,12	-0,56	-0,14	-0,21	0,45	0,02	-0,13
<b>Mo</b>		<b>1,00</b>	-0,22	-0,04	0,50	-0,17	0,44	-0,40	0,20	-0,06
<b>Ni</b>			<b>1,00</b>	-0,24	-0,29	-0,21	-0,06	0,25	0,12	-0,24
<b>Pb</b>				<b>1,00</b>	-0,18	<b>0,83</b>	-0,10	0,10	-0,10	<b>0,71</b>
<b>S</b>					<b>1,00</b>	-0,19	0,34	-0,86	0,15	-0,22
<b>Sb</b>						<b>1,00</b>	-0,12	0,11	-0,14	0,59
<b>Se</b>							<b>1,00</b>	-0,25	0,11	-0,17
<b>SiO2</b>								<b>1,00</b>	-0,14	0,09
<b>Te</b>									<b>1,00</b>	-0,13
<b>Zn</b>										<b>1,00</b>

На основе данных таблицы 13 была построена схема ветвящихся связей. На ней выделяются две группы элементов, связанные через Au, имеющее среднюю корреляцию к обеим группам. Первая группа

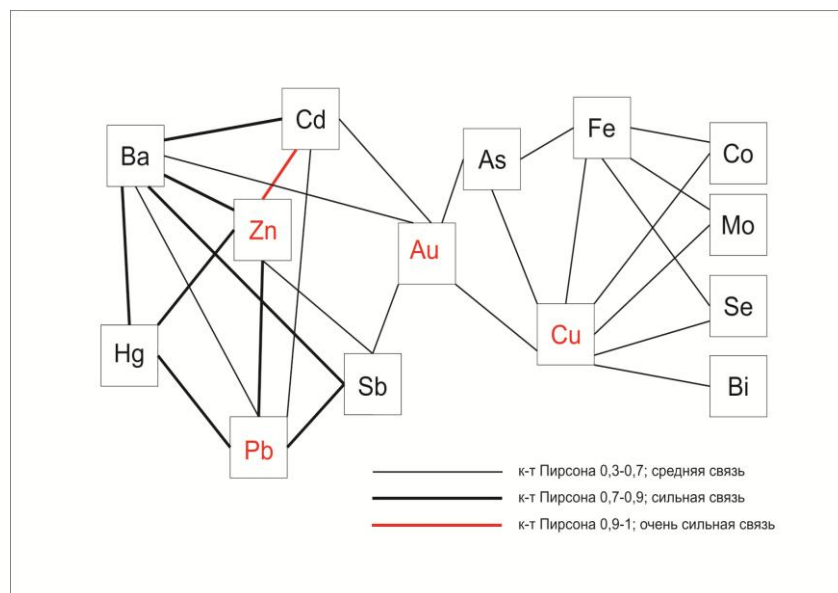


Рисунок 24: схема ветвящихся связей, полученная по результатам корреляционного анализа

связана с Cu и Fe и включает в себя такие элементы, как As, Co, Mo, Se, Bi. Вторая группа связана с Zn и Pb и включает в себя следующие элементы: Ba, Cd, Sb, Hg. Элементы первой группы тяготеют к минеральным ассоциациям горизонтов массивных сульфидных руд, в то время как элементы второй группы встречаются в выделенном нами горизонте сфалерит-барит-кремнистых образований (Zn-баритовой руде).

Для выявления основных факторов, руководящих распределением химических элементов, был проведён факторный анализ. Исходные данные для анализа составили три базы данных: общая по месторождению, общая по рудному телу «Западное», общая по рудным телам «Центральное» и «Западно-Центральное». Во всех трёх случаях наибольшая доля дисперсии системы принадлежит первым двум факторам. Первый фактор оказывает максимальное положительное влияние на такие элементы, как золото, кадмий, свинец, железо, барий, цинк, сера, мышьяк и другие (см.табл.14). Эти элементы формируют главные рудные минералы. Отрицательные нагрузки имеют алюминий, кальций, магний, кремний, никель – элементы,

тяготеющие как к неизменённым, так и к подвергшимся гидротермальной переработке материнским породам.

Таблица 14: факторные нагрузки 1 и 2 фактора на анализируемые элементы

	Общая		"Западное"		"Центральное"	
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 1	Фактор 2
As	0,65	-0,26	0,73	-0,07	0,84	-0,24
Co	0,43	0,41	0,36	0,52	0,70	0,38
Cu	0,62	0,13	0,64	0,38	0,63	-0,17
Fe	0,70	0,55	0,58	0,69	0,84	0,38
Mo	0,54	0,38	0,56	0,46	0,66	0,23
Ni	-0,12	0,34	-0,64	0,12	0,07	0,58
S	0,66	0,61	0,56	0,69	0,78	0,50
Al	-0,86	-0,15	-0,86	-0,09	-0,90	-0,09
Au	0,88	-0,07	0,86	-0,17	0,90	-0,11
Ba	0,67	-0,56	0,61	-0,63	0,68	-0,61
Bi	0,54	0,13	0,42	-0,02	0,79	-0,12
Ca	-0,82	0,01	-0,77	-0,14	-0,87	0,04
Cd	0,82	-0,16	0,82	-0,29	0,85	0,01
Hg	0,63	-0,49	0,67	-0,60	0,62	-0,41
Mg	-0,79	-0,21	-0,78	-0,33	-0,76	-0,18
Pb	0,80	-0,41	0,81	-0,49	0,84	-0,34
Sb	0,45	-0,41	0,35	-0,35	0,19	-0,30
Se	0,15	0,48	0,16	0,58	0,09	0,35
SiO <sub>2</sub>	-0,62	-0,47	-0,47	-0,57	-0,64	-0,37
Te	-0,02	0,56	-0,24	0,24	0,33	0,61
Zn	0,66	-0,54	0,74	-0,53	0,64	-0,52
Общ.дис.	8,52	3,27	8,44	3,95	10,20	2,73
Доля общ	0,41	0,16	0,40	0,19	0,49	0,13

Таким образом, можно предположить, что первый фактор отделяет собственно гидротермальные образования от первичных пород. Это подтверждается графически: на диаграмме рассеяния (рис. 26) материнские породы, представленные массивными неизменёнными вулканитами (литологический код VC), вулканокластической брекчией (VB), а также гидротермально-изменёнными (RC) и сульфатизированными базальтами (RA) лежат в области отрицательных значений первого фактора, в то время как все рудные горизонты – массивные сульфиды внутренней (RI) и внешней (CF) зон и Zn-баритовые руды (PT, SC) лежат в области положительных значений. Большой разброс значений осадков (SS, SC) свидетельствует о том, что в них гидротермальное вещество смешано с фрагментами породы.

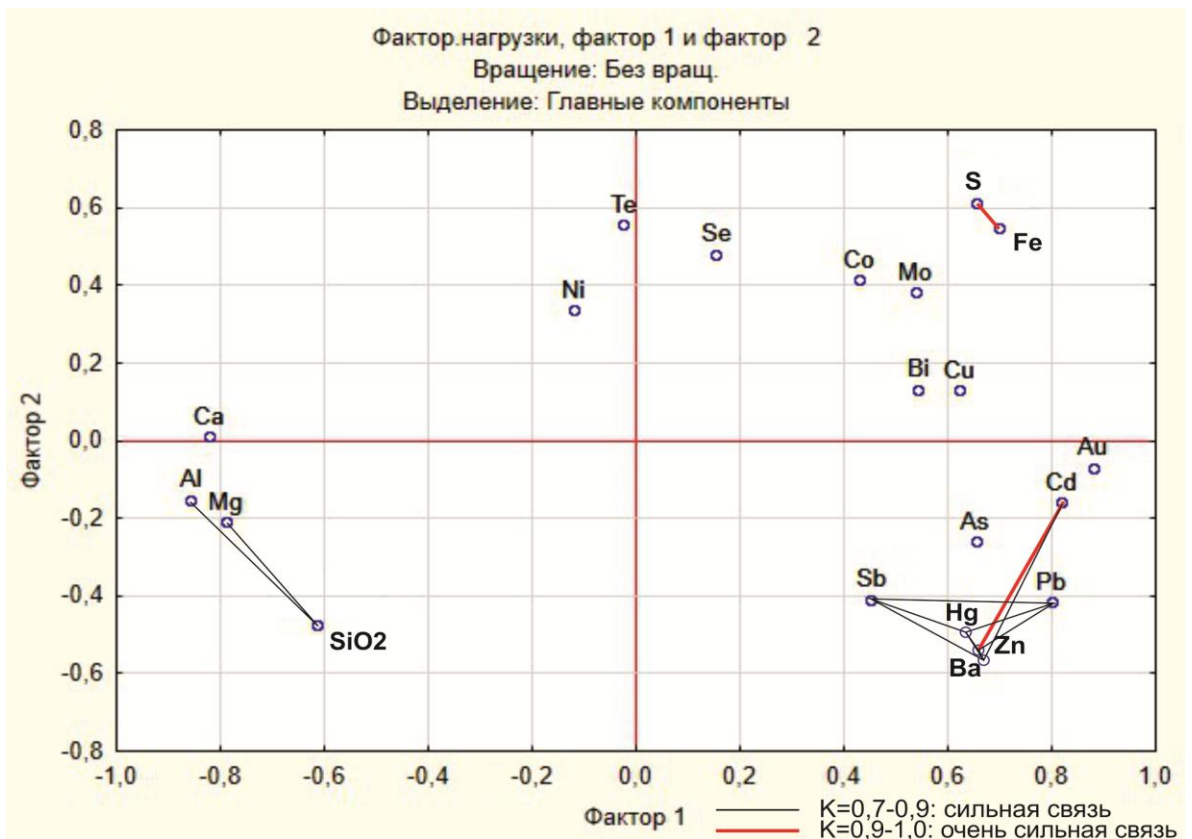


Рисунок 25: общая диаграмма факторных нагрузок 1 фактора относительно 2 фактора.

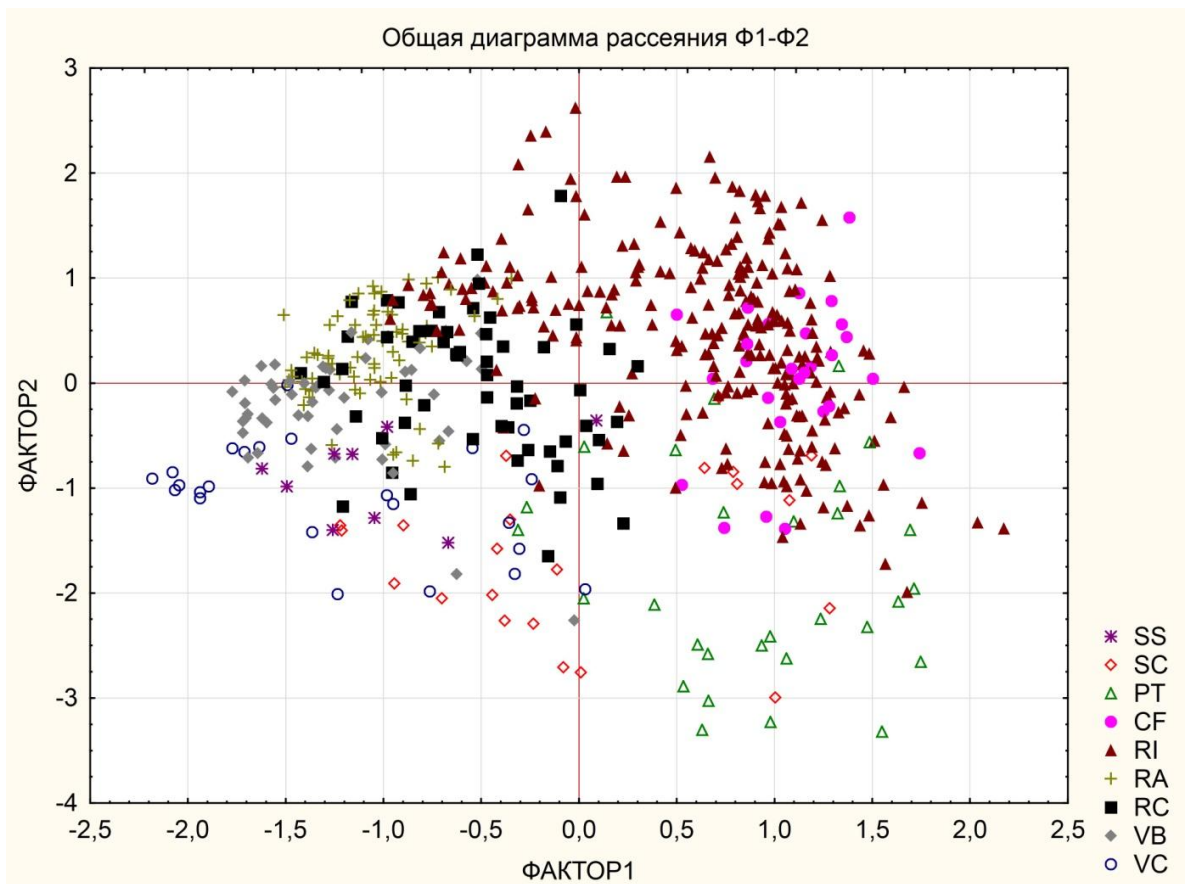
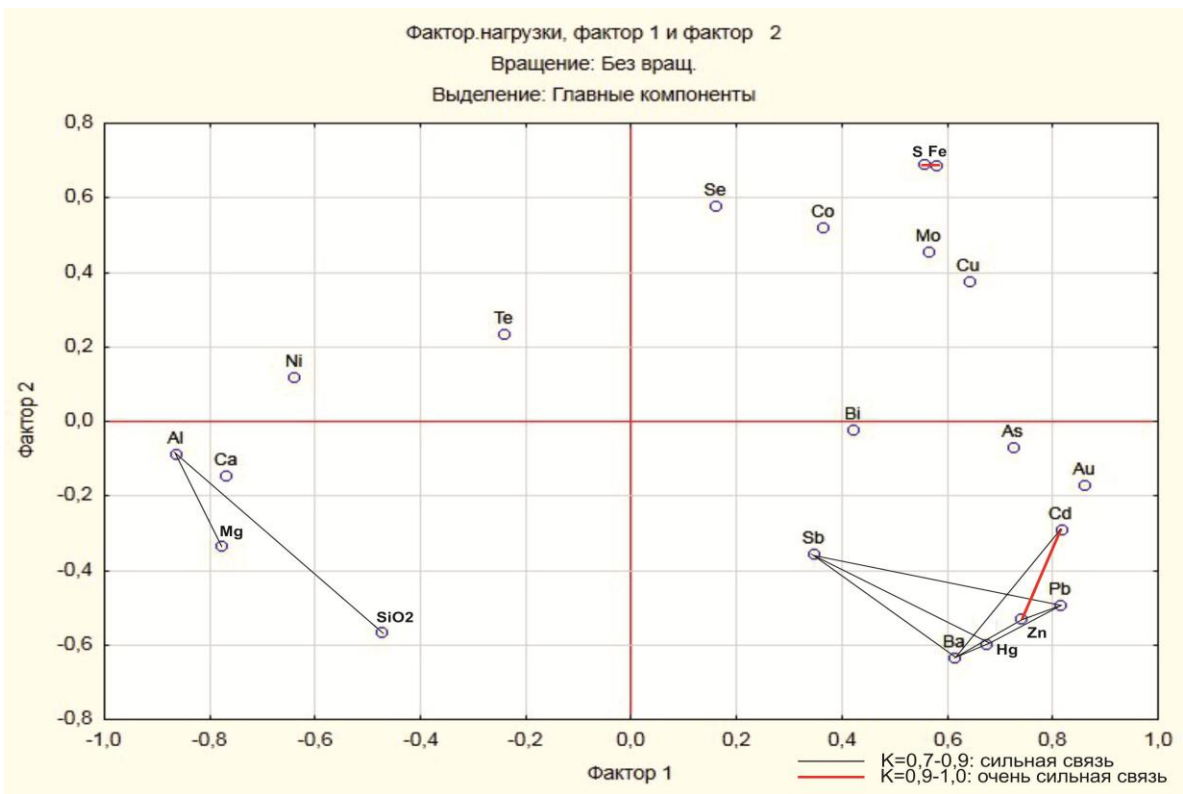
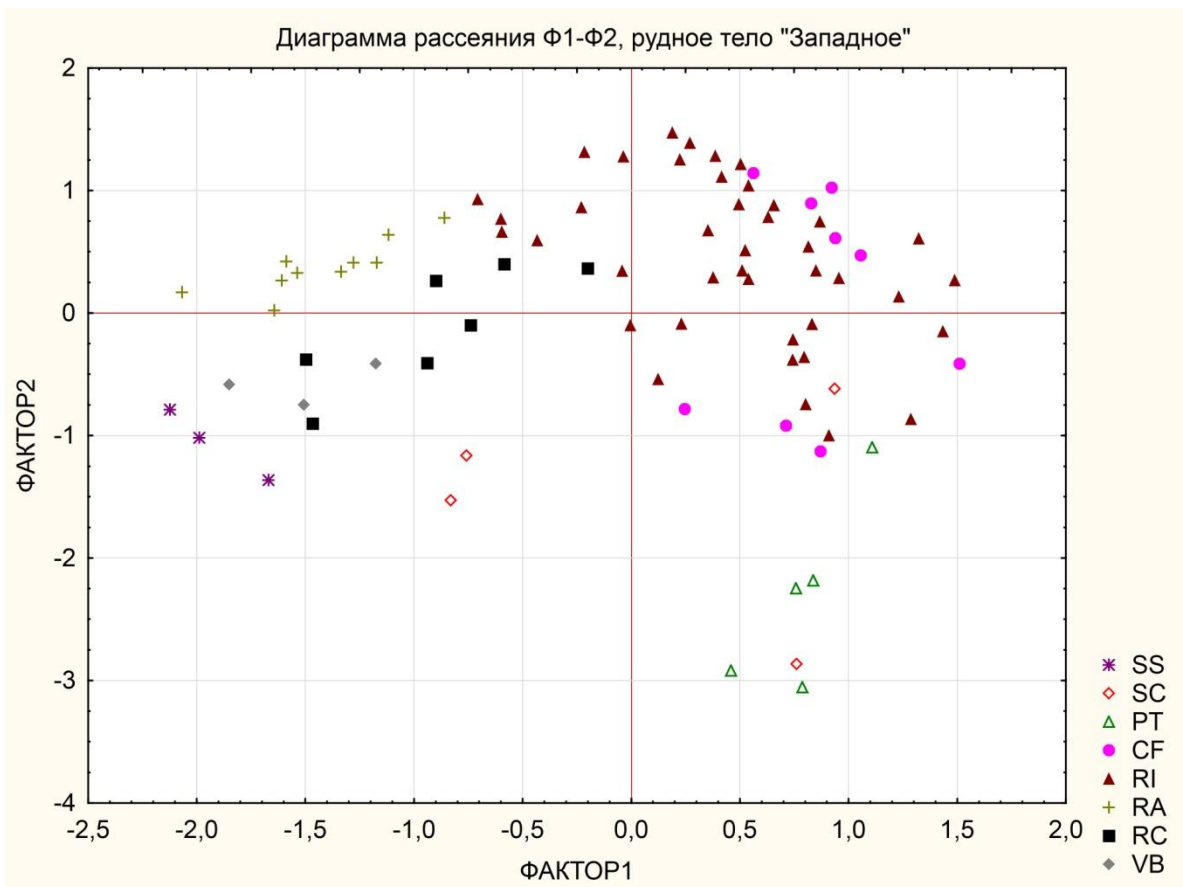


Рисунок 26: общая диаграмма рассеяния наблюдений по двум факторам; легенда составлена в соответствии с типами породно-рудных комплексов, выделенных в табл. 1



*Рисунок 27: диаграмма факторных нагрузок 1 фактора относительно 2 фактора для рудного тела «Западное».*



*Рисунок 28: диаграмма рассеяния наблюдений по двум факторам для рудного тела «Западное»; легенда составлена в соответствии с типами породно-рудных комплексов, выделенных в табл.1*

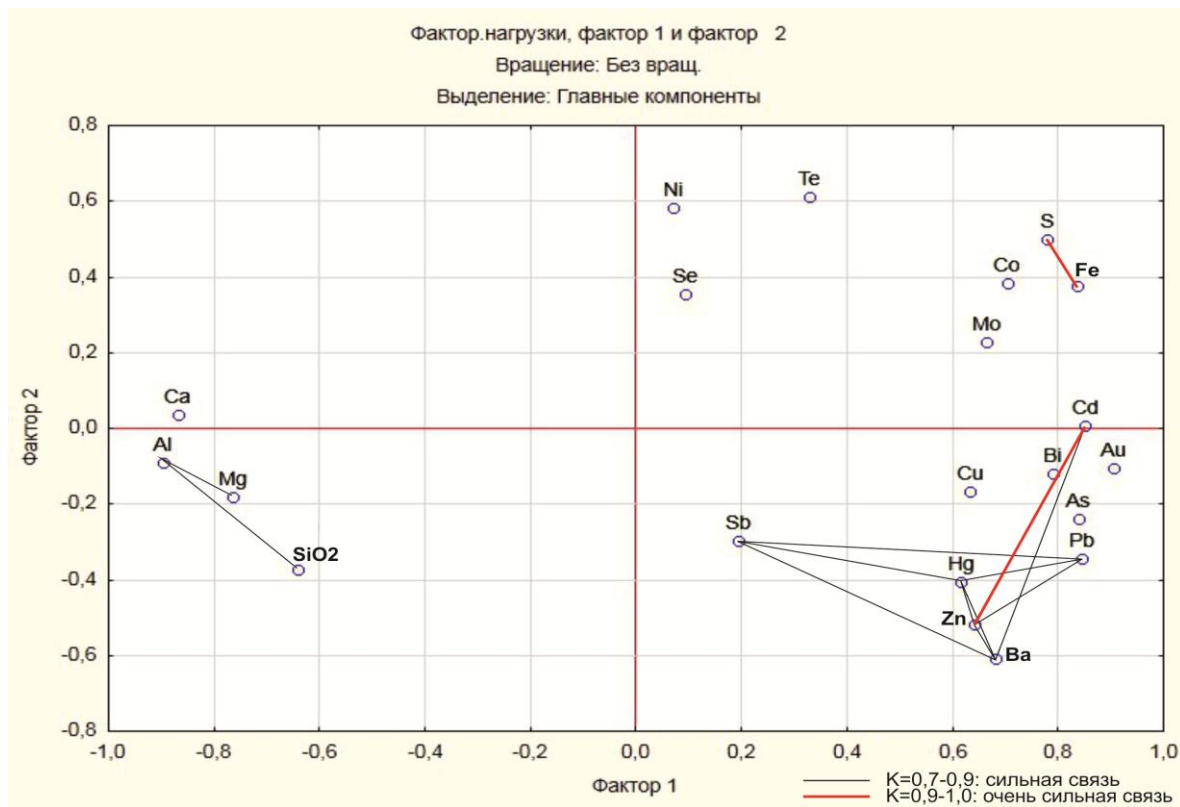


Рисунок 29: диаграмма факторных нагрузок 1 фактора относительно 2 фактора для рудного тела «Центральное».

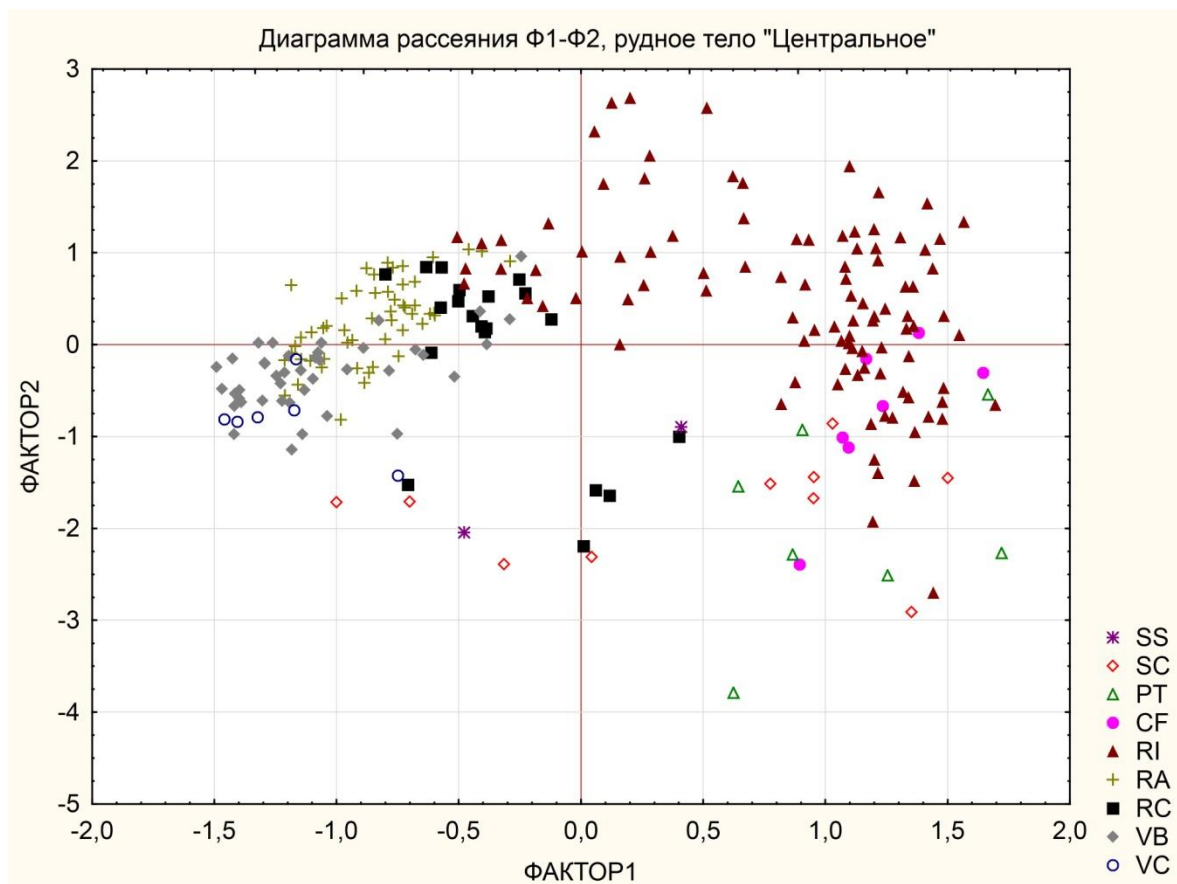


Рисунок 30: диаграмма рассеяния наблюдений по двум факторам для рудного тела «Центральное»; легенда составлена в соответствии с типами породно-рудных комплексов, выделенных в табл.1

Результаты факторного анализа по двум другим выборкам демонстрируют те же закономерности размещения переменных относительно первого фактора.

Второй фактор положительно влияет на серу, железо, никель, кобальт, селен, теллур и отрицательно – на барий, цинк, ртуть, кремний, свинец, сурьму и мышьяк (см.табл.14). Значение факторной нагрузки для меди варьирует от положительной (0,38 и 0,13) до отрицательной (-0,17), что свидетельствует о неоднозначном влиянии фактора на этот элемент. Второй фактор отделяет высокотемпературные рудные ассоциации во главе с пиритом от низкотемпературных, наиболее богатых по минеральному разнообразию. Медь, входящая в состав как халькопирита, ассоциирующего с пиритом, так и в состав блёклых руд в ассоциации с низкотемпературными сульфидами, испытывает в целом нейтральное влияние фактора, а знак нагрузки определяется тем, в какой фазе она встречалась чаще в данной выборке. Таким образом наблюдаем зональность по убыванию нагрузок второго фактора: массивные сульфиды внутренней зоны (литологический код RI), массивные сульфиды внешней зоны (литологический код CF), Zn-баритовый рудный горизонт (PT и SC).

Результаты факторного анализа подтверждаются диаграммами вариаций содержания химических элементов по вертикали (см.рис.31). В верхнем ряду представлены основные рудные элементы, в нижнем ряду – элементы, слагающие минералы материнской породы (базальта). Граница между 5 и 6 типами породно-рудных комплексов является своеобразным рубежом, по обе стороны которого происходят резкие скачки концентраций элементов. На основе этого был сделан вывод о существовании на этой границе поверхности палеодна. Ниже неё лежат сульфаты (в основном ангидрит), являющиеся результатом сильных гидротермальных преобразований первичных пород. Над поверхностью палеодна находятся

собственно руды, отложенные в результате активной гидротермальной деятельности. В соответствии с этими данными были внесены изменения в колонку основных типов породно-рудных комплексов (табл.1) и получена новая колонка (табл.2).

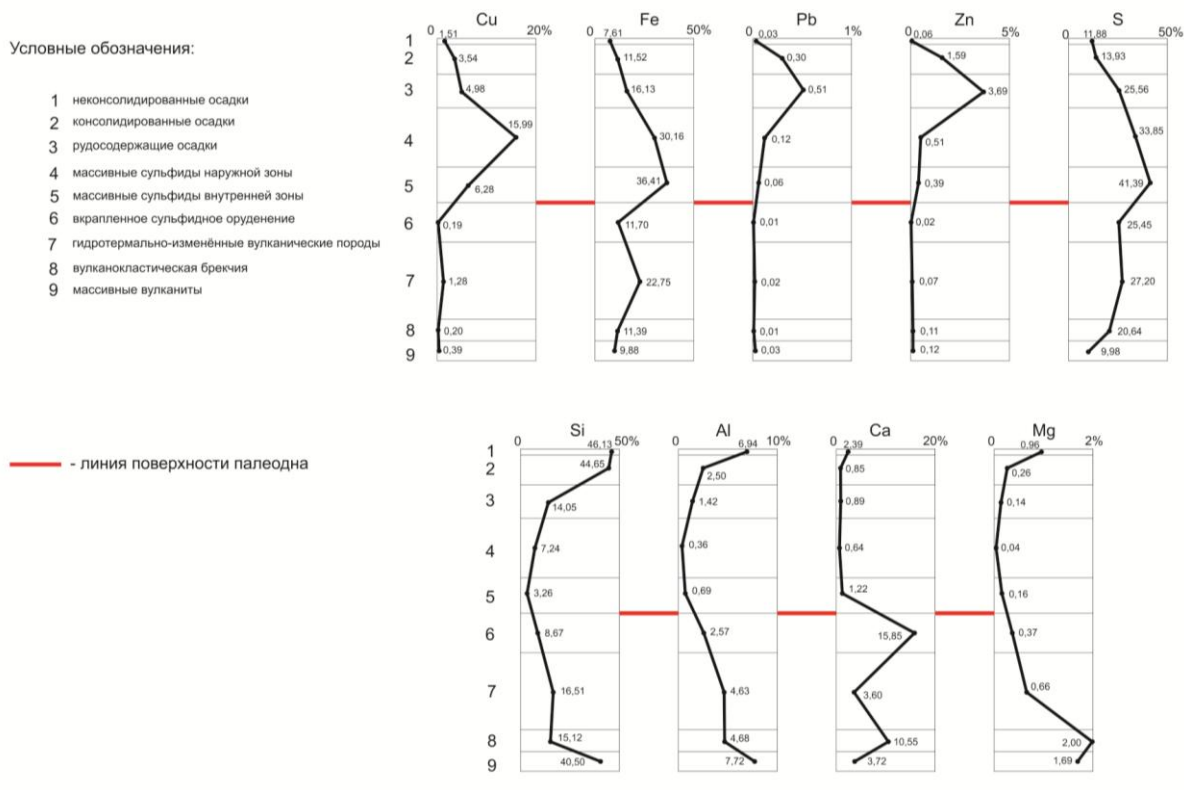


Рисунок 31: диаграммы вариаций содержания химических элементов по вертикали

Данные для построения диаграммы вариаций содержания химических элементов были рассчитаны для всего месторождения (см.табл.15). Значения рассчитывались как среднее арифметическое, количество проб в выборке обозначено под таблицей. В среднем в Мировом океане содержания основных рудных и попутных элементов составляют: Cu – 5,2%, Zn – 10,7%, Pb – 0,6%, S – 33,2%, Au – 3 г/т, Ag – 206 г/т<sup>1</sup>. Содержания меди и золота на

<sup>1</sup> (Классификация полезных и потенциально полезных редких и рассеянных элементов в составе глубоководных сульфидных руд на РПП-ГПС по степени их практической значимости с оценкой возможностей и целесообразности их технологического извлечения, 2015)



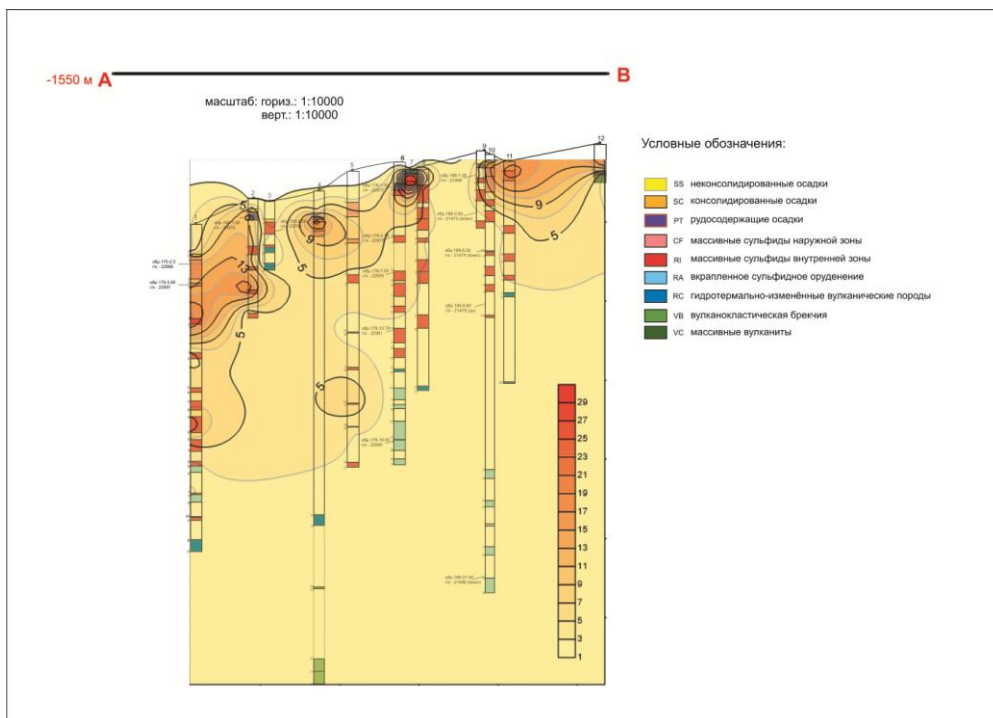
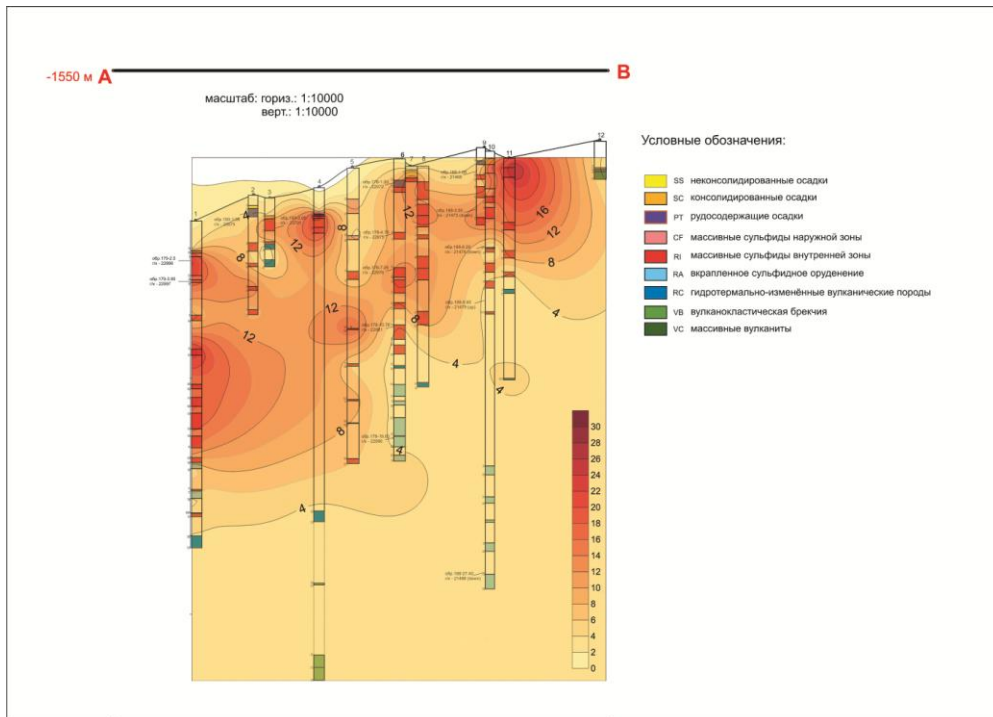
S-1 в целом превышают эти значения, а цинка и свинца – нет, что не мешает вести их добычу.

Таблица 15: содержания основных и редких элементов месторождения S-1

Примечание: жирным шрифтом выделены главные рудные элементы

элемент	тип породы/руды								
	SS	SC	PT	CF	RI	RA	RC	VB	VC
	Осадки	Zn-руды		Cu-руды		Гидротермально-изменённые вмещающие породы		Вмещающие породы	
Al, %	6,9	1,5	1,4	0,4	0,7	2,6	4,6	4,7	7,7
As, г/т	129	1811	1991	2079	1931	713	1090	1029	31
<b>Au, г/т</b>	0	11	9	12	6	1	1	1	0
Ba, %	1,2	10,0	20,7	3,6	2,1	0,1	0,6	0,2	0,7
Bi, г/т	3	3	21	109	61	8	9	4	3
Ca, %	2,4	0,9	0,9	0,6	1,2	15,9	3,6	10,6	3,7
Cd, г/т	4	108	153	48	34	9	16	9	5
Co, г/т	25	115	89	342	257	132	177	74	19
<b>Cu, %</b>	1,5	3,5	5,0	16,0	6,3	0,2	1,3	1,2	0,4
Fe, %	7,6	11,5	16,1	30,2	36,4	11,7	22,8	11,4	9,9
Hg, г/т	1	10	40	8	3	1	2	1	0
Mg, %	1,0	0,3	0,1	0,0	0,2	0,4	1,7	2,0	1,7
Mo, г/т	9	58	33	169	116	48	60	78	3
Ni, г/т	16	10	4	7	10	15	16	24	19
<b>Pb, %</b>	0,0	0,3	0,5	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
S, %	11,9	13,9	25,6	33,9	41,4	25,5	27,2	20,6	10,0
Sb, г/т	3	85	260	65	24	7	6	6	4
Se, г/т	7	58	10	117	108	81	90	19	1
SiO <sub>2</sub> , %	46,1	44,7	14,1	7,2	3,3	8,7	16,5	15,1	40,5
Te, г/т	1	0	0	0	1	1	1	0	0
<b>Zn, %</b>	0,1	1,6	3,7	0,5	0,4	0,0	0,1	0,1	0,1
number	9	22	30	27	248	72	58	53	24

Распределения химических элементов на S-1 исследовались не только статистически, но и графически. Для этого в программе Surfer были построены карты распределения четырёх основных рудных компонентов – Cu, Au, Zn, Pb – по разрезу тела «Западное» и совмещённого разреза «Центрального» и «Западно-Центрального» рудных тел.



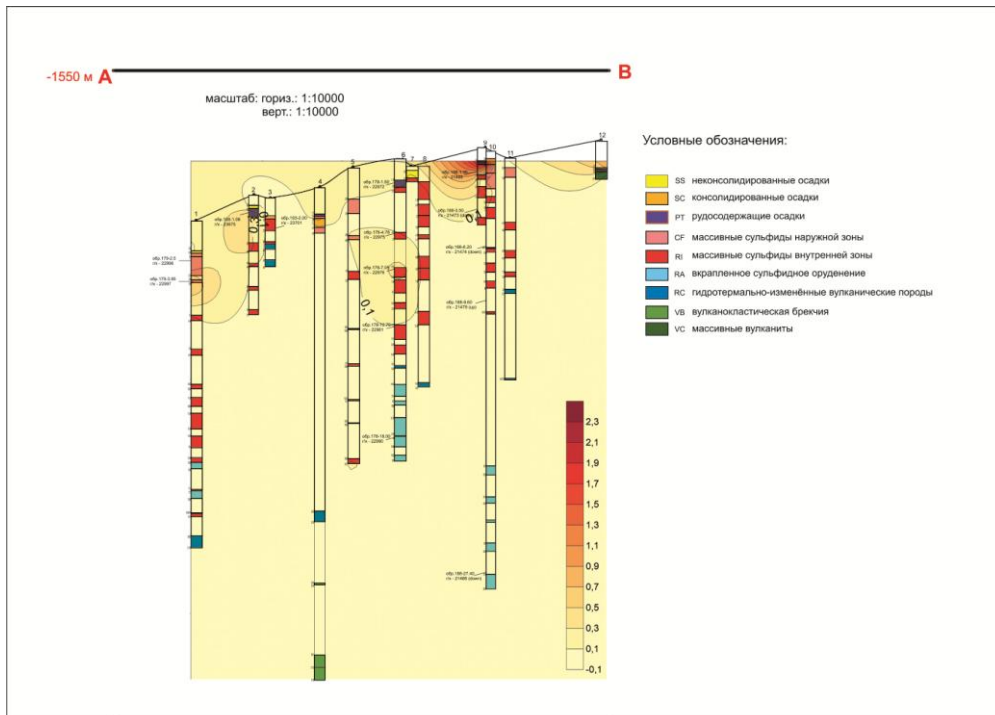


Рисунок 34: распределение свинца по разрезу рудного тела «Западное»

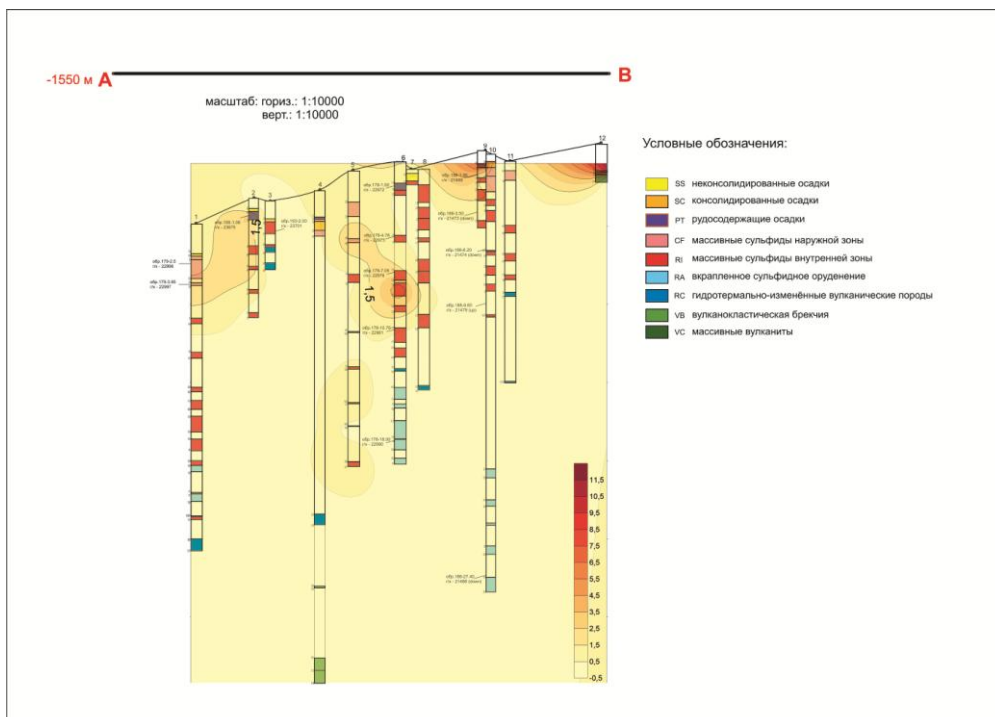


Рисунок 35: распределение цинка по разрезу рудного тела «Западное»

Карты распределения строились с учётом фоновых содержаний элементов на каждом рудном теле. Распределения содержаний элементов по разрезу рудного тела «Западное» иллюстрируют основные закономерности

размещения рудного вещества, обозначенные выше. Так, цинк и свинец имеют максимальные содержания в верхних частях разреза, а именно в горизонте Zn-барит-кремнистых образований, немного повышая свои концентрации относительно фона в осадках и массивных сульфидах внешней зоны. Золото приурочено и к массивным сульфидам, и к верхнему рудному горизонту, поскольку оно коррелирует и с медью в халькопирите, и с мышьяком и сурьмой в блёклых рудах (см.рис.24). Медь маркирует массивные сульфиды. Её распределение носит бимодальный характер, максимальные содержания отмечены в центрально-восточной и западной частях разреза. Это может означать наличие в этих местах двух флюидподводящих каналов, по которым происходило наибольшее отложение гидротермального вещества.

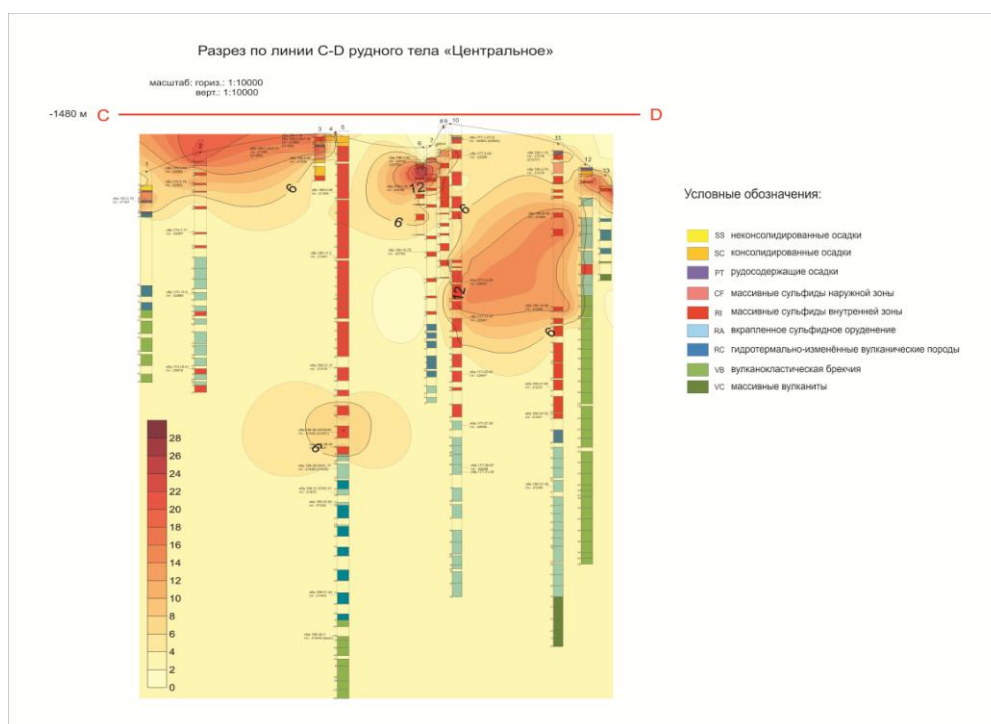
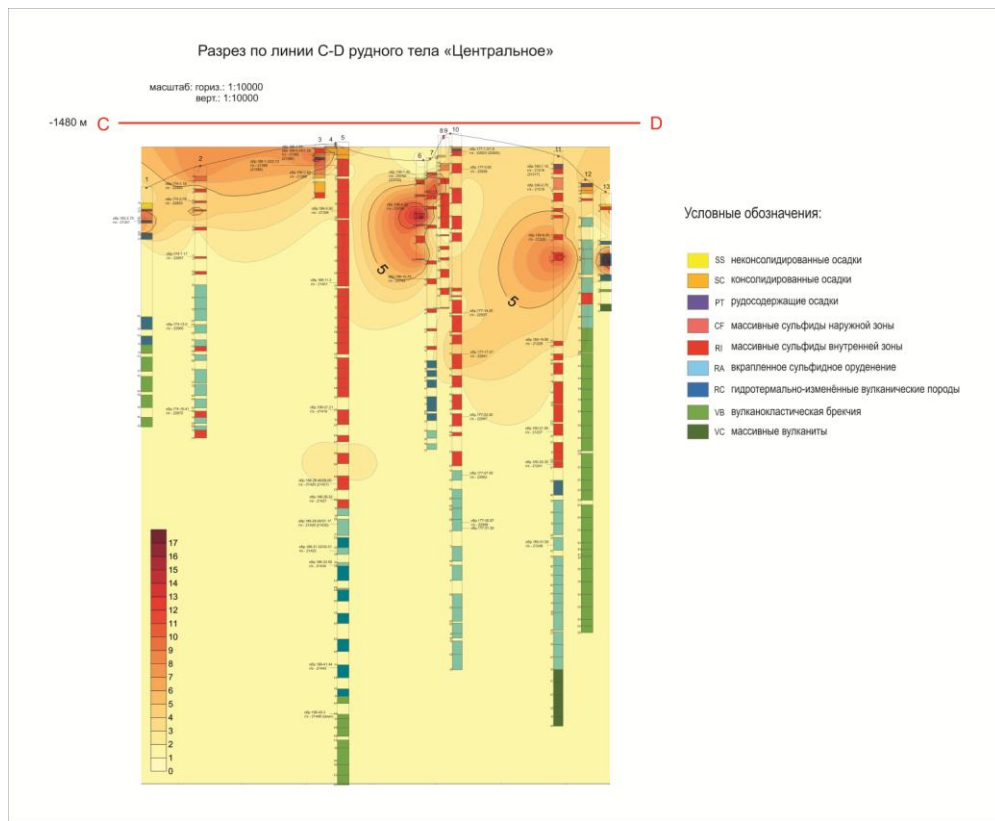
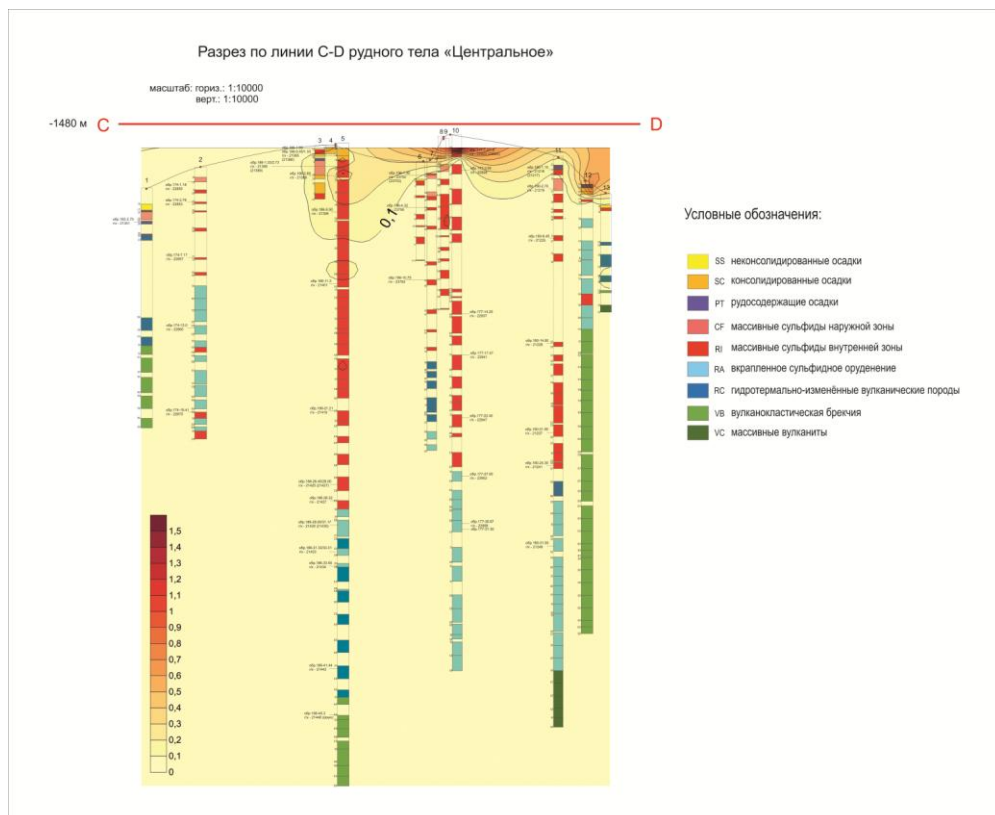


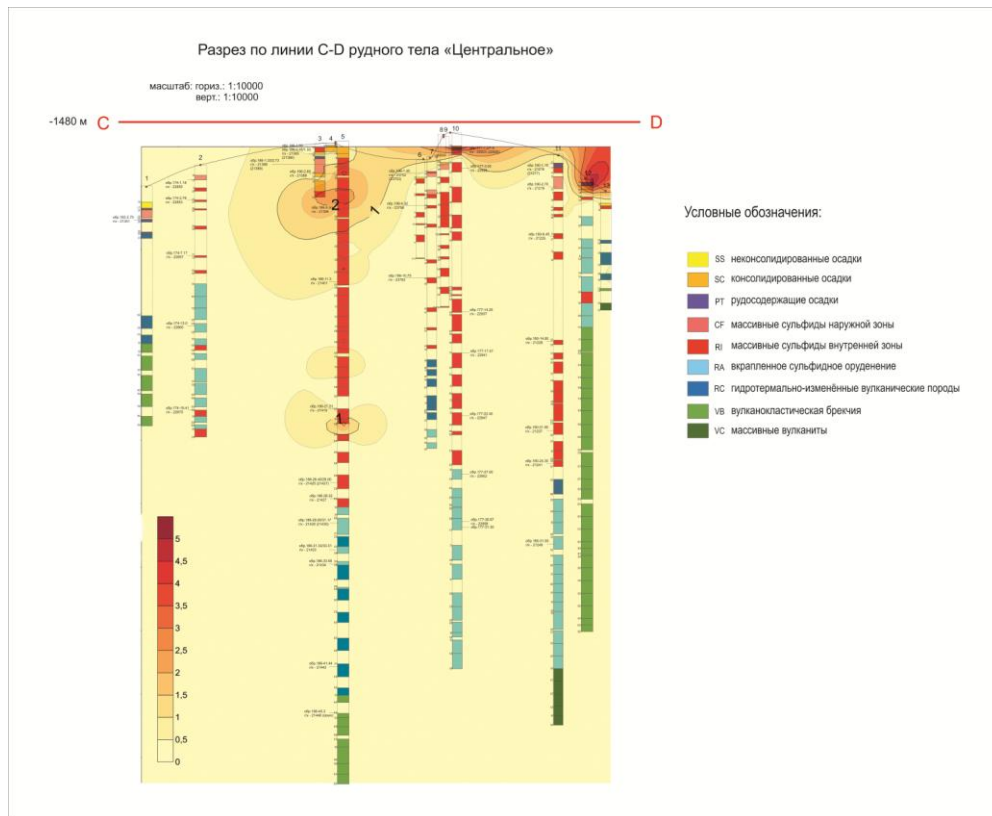
Рисунок 36: распределение меди по разрезу рудных тел «Центральное» и «Западно-Центральное»



*Рисунок 37: распределение золота по разрезу рудных тел «Центральное» и «Западно-Центральное»*



*Рисунок 38: распределение свинца по разрезу рудных тел «Центральное» и «Западно-Центральное»*



*Рисунок 39: распределение цинка по разрезу рудных тел «Центральное» и «Западно-Центральное»*

На картах распределения содержаний химических элементов, построенных для разреза рудных тел «Центральное» и «Западно-Центральное» цинк и свинец ведут себя так же, как и на «Западном» проявляя наибольшие концентрации в верхних частях разреза. Небольшая аномалия цинка и меди находится в массивных сульфидах скважины 4, на глубине около 28 метров. Её существование может объясняться движением вторичных более низкотемпературных растворов, поскольку ассоциация минералов меди, цинка и высокотемпературного пирита на таких глубинах нетипична. Золото на данном разрезе имеет большее сродство к массивным сульфидам, что подтверждается аналогичными участками проявления максимальных концентраций меди. Флюидподводящий канал предположительно один.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полученные данные позволяют выявить и изучить основные минералогические и геохимические характеристики сульфидного гидротермального месторождения S-1, смоделировать особенности строения его рудных тел. В результате минералогических исследований были определены и изучены основные минералы рудных горизонтов, их морфологические особенности и химический состав, выделены основные примеси. В результате геохимических исследований были выявлены связи между химическими элементами – основными рудными, попутными, редкими и рассеянными, а также элементами материнских пород и осадков. Было изучено распределение вещества на S-1 – графически – в пределах двух разрезов, а также статистически. Факторный анализ позволил определить и проинтерпретировать основные факторы, влияющие на распределения элементов.

## ВЫВОДЫ

В результате изучения распределения химических элементов в рудных телах месторождения S-1 сделаны выводы о его строении, составе и генезисе слагающих его руд.

1. В пределах рудного поля Сольвара руды представлены массивными и прожилково-вкрапленными разновидностями. Массивные сульфидные руды имеют медную и цинковую специализацию, прожилково-вкрапленные - медную. Медные руды слагают внутреннюю зону (собственно массивную) и внешнюю зону (зона «трубных комплексов»), цинковые залегают поверх медных в более верхних частях.
2. Выделен дополнительный рудный горизонт сфалерит-барит-кремнистого состава – Zn руда.
3. Медные руды представлены пиритом и халькопиритом. Цинковые – сфалеритом и барит-опалом в подчиненном количестве. Данная последовательность, возможно, связана с изменением температуры рудоносного флюида. Также в результате поступления нескольких флюидов на разных этапах более мобильный цинк мог выноситься в более поверхностные горизонты (зонная чистка).
4. Корреляционные связи между элементами позволили выявить две геохимические ассоциации-медную (Cu – Fe, As, Co, Mo, Se, Bi, Au) и свинцово-цинковую (Zn – Pb, Cd, Sb, Ba, Hg, Au), которые прослеживаются во всех рудных телах в различных рудных горизонтах. Наличие золота в обеих ассоциациях свидетельствует о его бимодальном поведении, так как оно встречается и в халькопирите, и в блёклых рудах.



5. Между массивными сульфидами внутренней зоны и гидротермально-изменёнными сульфатизированными базальтами зафиксирована поверхность палеодна, выше которой началось отложение гидротермального материала. Гидротермально-изменённые вмещающие породы содержат в себе штокверковую зону с прожилково-вкрапленной сульфидной минерализацией.

## ИСТОЧНИКИ

Авдейко Г.П., Краснов С.Г. Сульфидные руды и их связь с подводными вулканами и гидротермами островных дуг// Вулканология и сейсмология. 1985. №4. С. 26-39.

Батурин Г.Н. Руды океана. Москва: Наука.1993. 303 с.

Бетехтин А.Г. Курс минералогии. Москва: Издательский дом "КДУ". 2014. 735 с.

Богданов Ю.А., Лисицын А.П., Сагалевич А.М., Гурвич Е.Г. Гидротермальный рудогенез океанского дна. Москва: Наука. 2006. 526 с.

Богданов Ю.А., Сагалевич А.М. Геологические исследования с глубоководных обитаемых аппаратов «Мир». Москва: Научный мир. 2002. 304 с.

Бутузова Г.Ю. Типы современных гидротермальных и гидротермально-осадочных образований активных зон Мирового океана// Литология и полезные ископаемые. 1989. №5. С. 3-24.

Грамберг И.С., Краснов С.Г., Айнемер А.И. и др. Гидротермальное сульфидное оруденение в океане// Сов. геология. 1990. №12. С.81-90.

Деков В.М. Гидротермальное осадкообразование в Тихом океане. Москва: Наука. 1994. 208 с.

Классификация полезных и потенциально полезных редких и рассеянных элементов в составе глубоководных сульфидных руд на РРР-ГПС по степени их практической значимости с оценкой возможностей и целесообразности их технологического извлечения [отчёт]. Санкт-Петербург: ФГУП "ВНИИОкеангеология им. И.С.Грамберга". 2015.

Кононов В.И. Геохимия термальных вод областей современного вулканизма. Москва: Наука. 1983. 216 с.

Краснов С.Г., Черкашев Г.А., Айнемер А.И., Гринталь Э.Ф. и др. Гидротермальные сульфидные руды и металлоносные осадки океана. СПб: Недра. 1992. 277 с.

Курносов В.Б. Природа горячих источников в океане и их роль в образовании руд и осадков// Геол. морей и океанов. Ленинград: ПГО Севморгеология. 1988. С.62-70.

Лебедев Л.М. Современные рудообразующие гидротермы. Москва: Недра. 1975. 262 с.

Леин А.Ю., Ульянова Н.В., Гриненко В.А. и др. Минералогическо-геохимические особенности гидротермальных сульфидных руд бассейна Манус (море Бисмарка)// Геохимия. 1993. №4. С.524-537.

Пампура В.Д. Геохимия гидротермальных систем областей современного вулканизма. Новосибирск: Наука. 1985. 152 с.

Холанд Г.Д., Малинин С.Д. Растворимость и распределение нерудных минералов. Геохимия гидротермальных рудных месторождений. Москва: Мир. 1982. С.370-404.

Шадлун Т.Н., Бортников Н.С., Богданов Ю.А. и др. Минеральный состав, текстуры и условия образования современных сульфидных руд в рифтовой зоне бассейна Манус// Геология руд. Месторождений. 1992. №5. С.3-21

Binns R.A., Scott S.D. Western Woodlark Basin: potential analogue setting for volcanogenic massive sulfide deposits// Econ. Geol. 1993. Vol.186. P. 293-312.

Bostrom K., Joensuu O., Moore C. et al. Geochemistry of barium in pelagic sediments// Lithos. 1973. Vol.6. №2. P.159-174.

Both R., Crook K., Taylor B. et al. Hydrothermal chimneys and associated fauna in the Manus back-arc basin, New Guinea// EOS. Trans. Amer. Geophys. Union. 1986. Vol.67. N.21. P. 489-490.

David J. Vaughan, James R. Craig. Mineral chemistry of metal sulfides. Cambridge: Cambridge University Press. 1978.

Fouquet Y., Henry K., Knott R. et al. Geochemical section of the Tag hydrothermal mound// Proceedings of the Ocean Drilling Program: Scientific results. 1998. Vol. 158. P. 363-387.

Halbach P.E., Fouquet Y., Herzig P. Energy and mass transfer in marine hydrothermal systems// Miner.deposita. 2001. P. 85.

Krasnov S.G., Poroshina J.M., Cherkashev G.A. Geological setting of high-temperature hydrothermal activity and massive sulfide formation on fast- and slow-spreading ridges// Ibid.1995. P.17-32.

Lipton, J. MINERAL RESOURCE ESTIMATE Solwara Project, Bismarck Sea, PNG [отчёт]. 2012. 217 p.

Mackdonald A.H., Fyfe W.S. Role of serpentinization in seafloor environment// Technophysics. 1985. Vol.116. P.113-135.

Melekestseva I.Yu., Maslennikov V.V., Tretyakov G.A. et al. Gold- and Silver-Rich Massive Sulfides from the Semenov-2 Hydrothermal Field, 13°31.13'N, Mid-Atlantic Ridge: A Case of Magmatic Contribution?// Econ. Geol. 2017. Vol.112. P.1-33

Von Damn K.L. Seafloor hydrothermal activity: Black smoker chemistry and chimneys// Annu. Rev. Earth and Planet. Sci. 1990. Vol.18. P.173-204.

Deepwater explorations. [Электронный ресурс] /National oceanic and atmospheric administration/ Режим доступа: <https://oceanexplorer.noaa.gov>, свободный. (Дата обращения: 25.04.2018 г.).

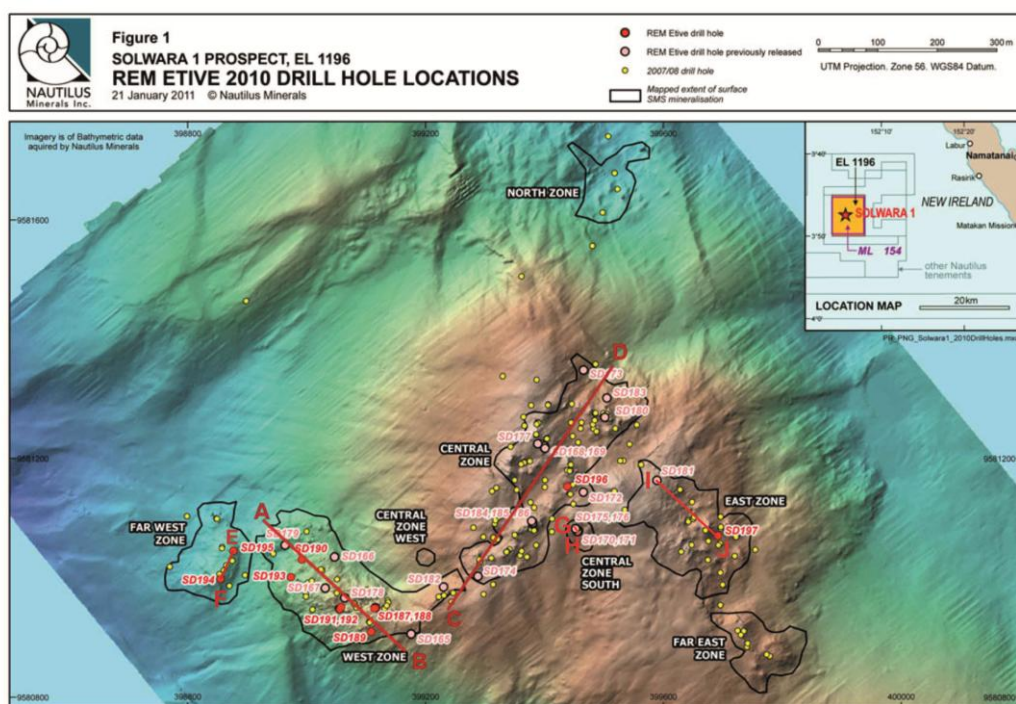
Technical reports. [Электронный ресурс] /Nautilus Minerals/ Режим доступа: <http://www.nautilusminerals.com>, свободный. (Дата обращения: 10.03.2018 г.).

# Приложение

## Приложение 1: разрезы рудных тел

### 1.1 Схема расположения разрезов рудных тел

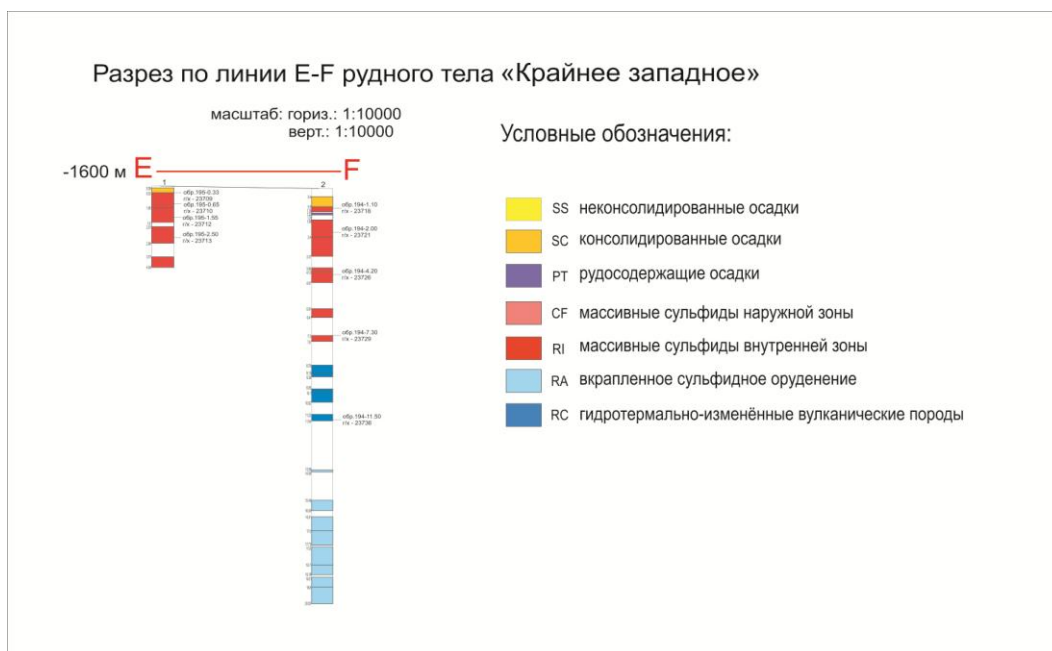
Примечание: в дальнейшем номера скважин заменены порядковыми числами



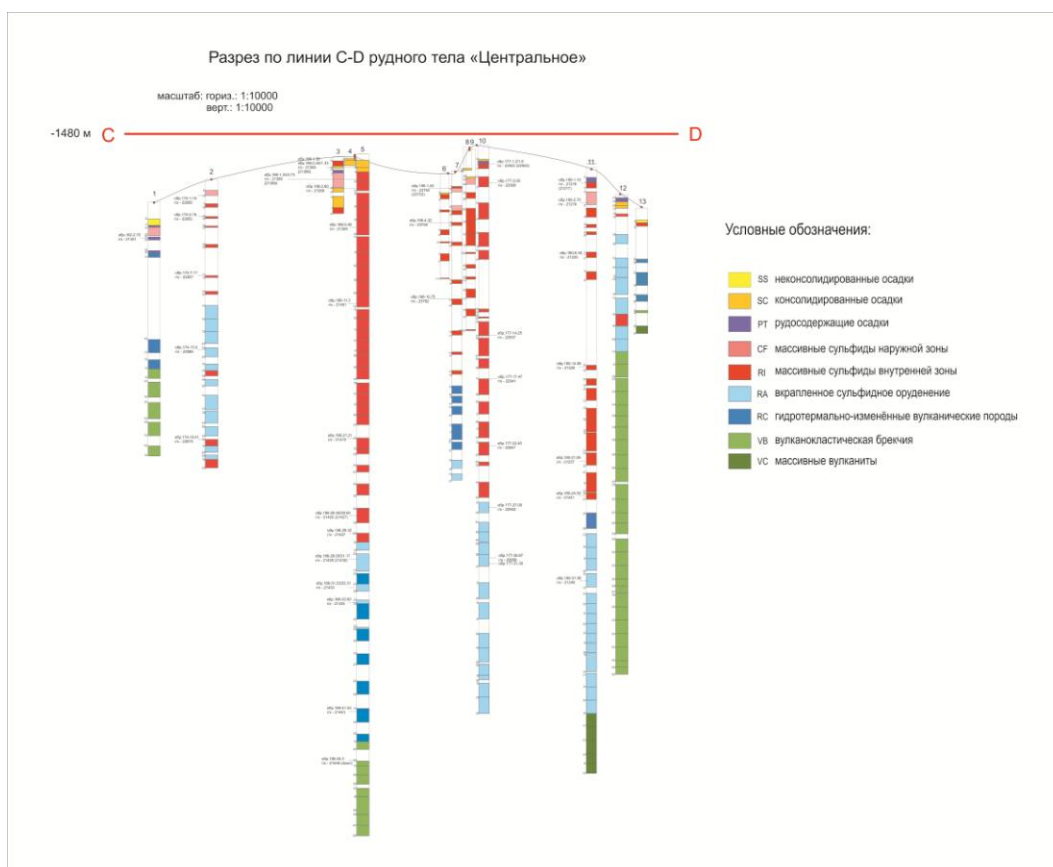
### 1.2 Рудное тело «Западное»



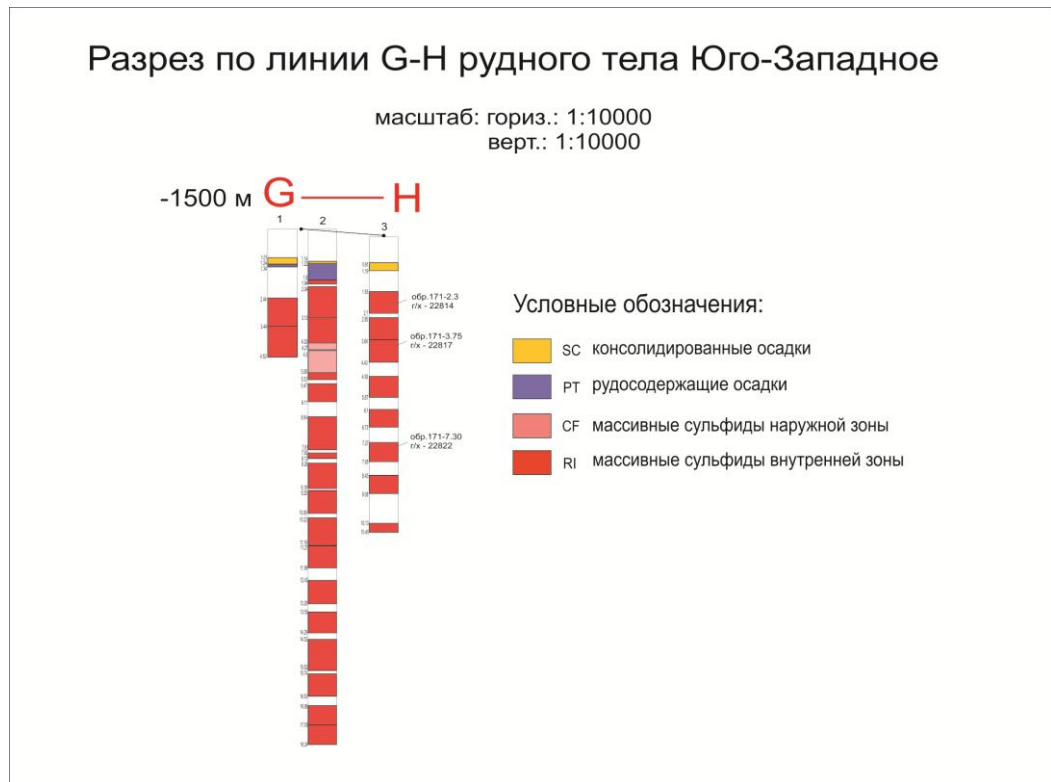
### 1.3 Рудное тело «Крайнее западное»



### 1.4 Рудные тела «Центральное» и «Западно-Центральное»: совмещённый разрез



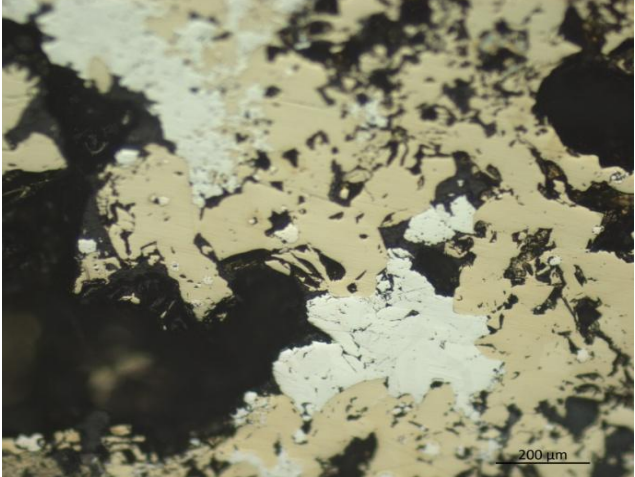
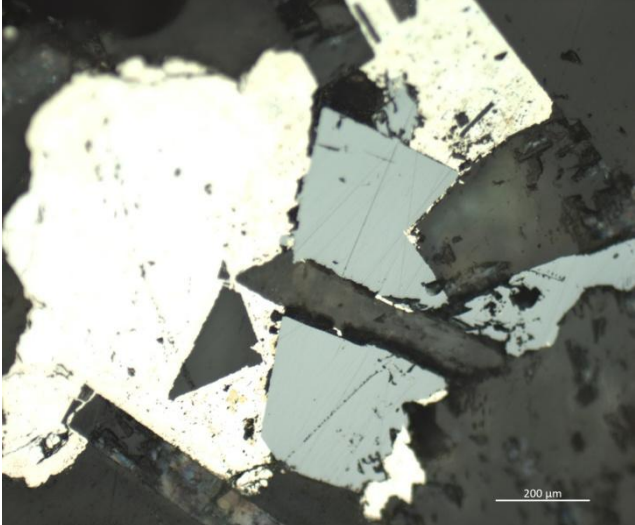
## 1.5 Рудное тело «Юго-Центральное»



## 1.6 Рудное тело «Восточное»

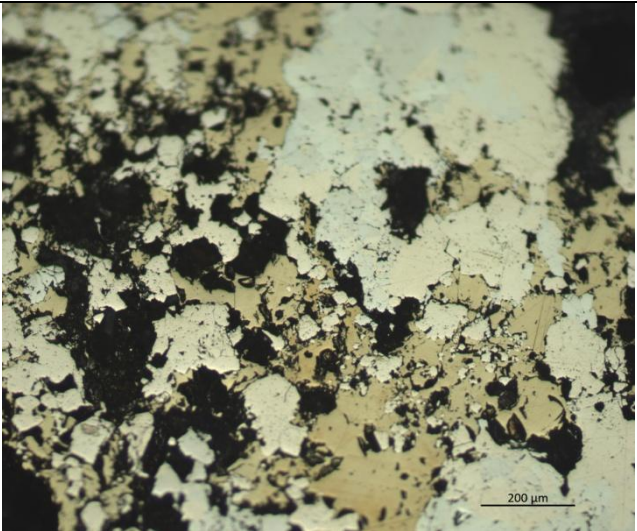
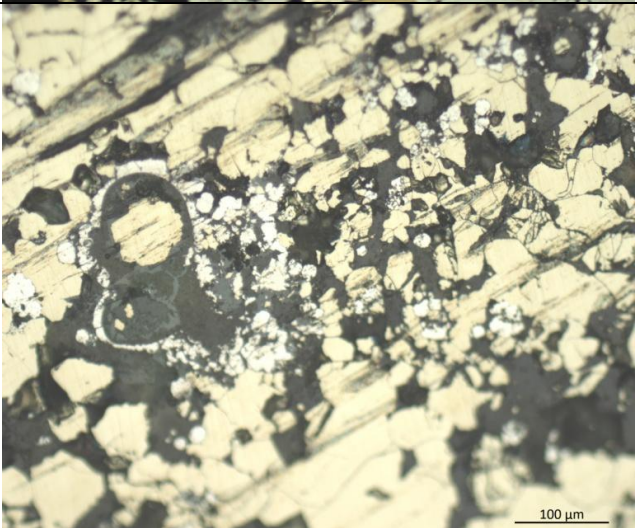



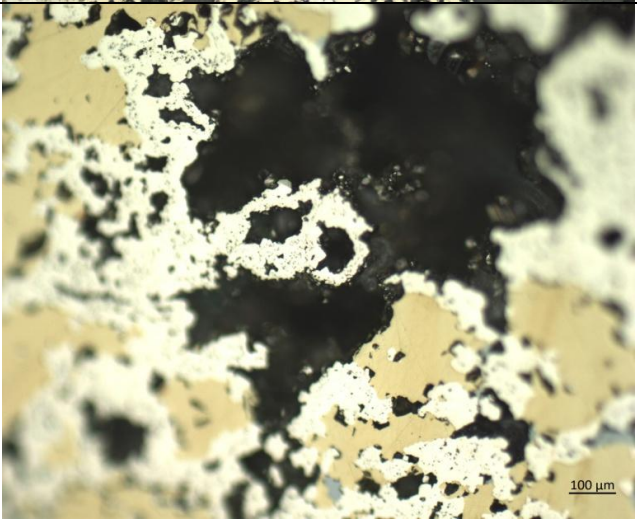
**Приложение 2:** результаты микроскопического анализа некоторых образцов руд трёх рудных горизонтов

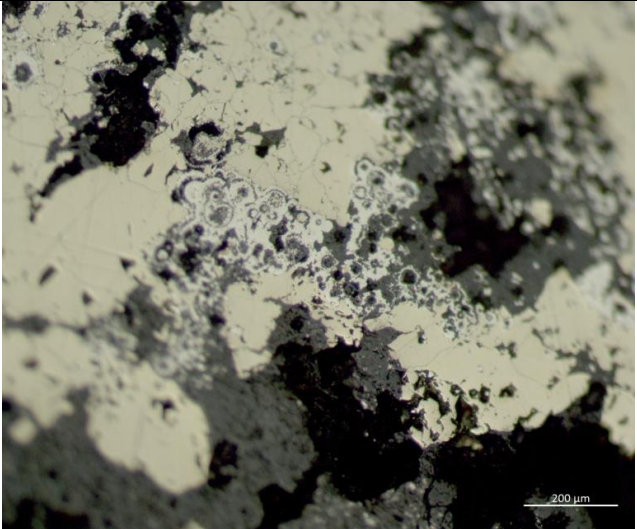

Рудный горизонт	Рудное тело	№ скважины	№ образца	Описание	Фотография
Сфалерит-барит-кремнистая руда	«Восточное»	В-2	В-2-4,15	<p>Рудная часть образца представлена массивным халькопиритом (60%) и пиритом (25%), образующим кубические кристаллы, концентрические образования, а также слагающий массы неясной формы размером до 1 мм. 10-15% аншлифа занимают зёрна сфалерита и блёклой руды (теннантит). Много нерудного вещества.</p>	
	«Северное»	С-4	С-4-1,80	<p>Рудная часть образца представлена блёклыми рудами с преобладанием теннантита над тетраэдритом (70:30%), халькопиритом, пиритом, сфалеритом. Много нерудного вещества.</p>	

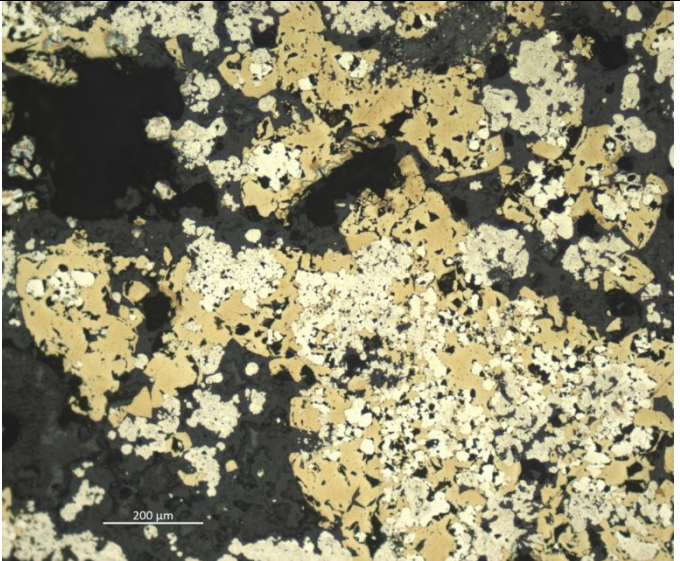


Сфалерит-барит-кремнистая руда	«Юго- центральное»	ЮЦ-3	ЮЦ-3- 3,75	<p>Образец представлен блёклой рудой, преимущественно теннантитом (60%), а также пиритом, образующим фрамбоиды до 1мм (в среднем 0,2-0,5 мм). Теннантит образует сплошные массы и отдельные кристаллы тетраэдрического облика. Вокруг пор часто наблюдается халькопирит в виде концентрических образований. Присутствуют отдельные зёрна сфалерита. По данным Nautilus Minerals отнесён к массивным сульфидам внутренней зоны, исправления внесены после изучения минералогии.</p>	
	«Центральное»	Ц-1	Ц-1- 2,70	<p>Образец представлен халькопиритом, занимающим практически весь объём шайбы. Пирит и сфалерит встречены в виде отдельных зёрен размером до 0,05 мм. Много нерудного вещества.</p>	

Сфалерит-барит-кремнистая руда	«Западное»	3-10	3-10-1,00	<p>Образец представлен в основном марказитом (до 70%) и халькопиритом. Марказит помимо массивных агрегатов образует также концентрические и остроугольные разности размером до 0,1 мм. Халькопирит массивный. Много нерудного вещества.</p>	 <p>200 μm</p>
Массивные сульфиды внешней зоны	«Западное»	3-1	3-1-2,50	<p>Образец сложен двумя минералами – массивным халькопиритом (до 70%) и пиритом (30%), формирующим мелкие концентрические образования. Их размер варьирует от 0,01 до 0,1 мм.</p>	 <p>100 μm</p>

<p>Массивные сульфиды внешней зоны</p>	<p>«Центральное»</p>	<p>Ц-2</p>	<p>Ц-2-1,18</p>	<p>Образец представлен в основном халькопиритом (до 80%), слагающим сплошные массы, кристаллами пирита (15%) и редкими зёрнами сфалерита (5%). Помимо кристаллов пирит образует «натёчные» формы.</p>	
<p>Массивные сульфиды внутрен. зоны</p>	<p>«Северное»</p>	<p>С-4</p>	<p>С-4-6,30</p>	<p>Образец представлен массивным халькопиритом (70%) и пиритом (30%) в виде концентрических образований вокруг пор (0,001 до 0,3 мм) и сплошных масс.</p>	

Массивные сульфиды внутренней зоны	«Центральное»	Ц-10	Ц-10-3,00	<p>Образец представлен массивным халькопиритом (90%) и пиритом (10%), формирующим образования неправильной и фрамбоидальной формы (фрамбоиды в среднем имеют размер 0,01-0,02 мм), располагающиеся в основном вокруг полостей и каналов на поверхности аншлифа.</p>	
	«Крайнее западное»	КЗ-2	КЗ-2-1,10	<p>Образец представлен массивным халькопиритом (70%) с включением неясной формы пирита (20%) и небольшим (менее 10%) количеством сфалерита в зёрнах размером ок.0,01 мм</p>	

Массивные сульфиды внутренней зоны	«Крайнее западное»	КЗ-2	КЗ-2-4,10	Образец представлен двумя минералами – массивным халькопиритом и пиритом (50:50%). Пирит образует сложной формы выделения, часто концентрического облика вокруг пор и каналов.	
	«Центральное»	Ц-5	Ц-5-28,32	Образец содержит наряду с рудными минералами большое количество нерудного вещества (ок.50%) – сульфатов, что является следствием большой глубины и близким расположением сульфатизированных базальтов. Рудное вещество представлено массивным халькопиритом и пиритом, слагающим концентрические агрегаты (0,02 мм) и образования неясной формы.	