

*На правах рукописи*

**СУХАНОВА Анна Алексеевна**



**МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ  
ГЛУБОКОВОДНЫХ СУЛЬФИДНЫХ РУД ПОЛЯ  
ЮБИЛЕЙНОЕ (РОССИЙСКИЙ РАЗВЕДОЧНЫЙ РАЙОН  
СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА)**

*Специальность 25.00.09 – Геохимия, геохимические методы  
поисков полезных ископаемых*

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук**

**Санкт-Петербург – 2018**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

*Научный руководитель:*

доктор геолого-минералогических наук, профессор,  
член-корреспондент РАН

*Марин Юрий Борисович*

*Официальные оппоненты:*

*Габлина Ирина Федоровна*

доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт Российской академии наук, главный научный сотрудник.

*Римская-Корсакова Мария Николаевна*

кандидат химических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, старший научный сотрудник.

*Ведущая организация:*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук

Защита состоится 14 декабря 2018 г. в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.04 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru)

Автореферат разослан 12 октября 2018 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



ГУЛЬБИН  
Юрий Леонидович

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** На протяжении 40 лет исследования глубоководных сульфидных руд приобрели не только научный характер, но и, особенно в последние годы, неоспоримую практическую значимость. В 2010 г. Международный орган по Морскому дну (МОМД) при ООН принял правила поисков и разведки полиметаллических сульфидов в Атлантике в международном районе морского дна. Российской Федерацией была подана заявка на разведочный участок Срединно-Атлантического хребта (САХ), принятая в 2012 году. Контракт между МОМД и Министерством природных ресурсов и экологии РФ был заключен 29 октября 2012 г. Российский разведочный район (РРР) расположен в центральной части Атлантического океана в осевой зоне САХ в интервале 12°48'36" - 20°54'36" с.ш. Он включает 100 блоков размером приблизительно 10x10 км каждый. По истечении 15-летнего Контракта только 25 блоков могут быть признаны перспективными для дальнейшего освоения, остальные будут возвращены в МОМД.

Рудное поле Юбилейное было открыто в 2012 г. и является первым полем, открытым в рамках подписанного Контракта в ходе 35 и 36 рейсов НИС «Профессор Логачев», исполнителями которых являлись сотрудники ПМГРЭ, ВНИИОкеангеология, ВИМС, ЦНИГРИ и Севморгео. Комплексный анализ минералого-геохимических особенностей сульфидных руд поля Юбилейное будет способствовать не только получению новых данных об особенностях процесса океанического рудогенеза, но и позволит предложить критерии оценки рудных объектов (блоков) для последующего освоения.

**Цель работы.** Выявление минералого-геохимических особенностей и условий формирования сульфидных руд поля Юбилейное для установления закономерностей их распространения в контуре рудного поля и оценки перспективности его освоения.

**Задачи исследования:**

- изучить особенности минерального состава сульфидных руд и выделить их основные типы;
- охарактеризовать особенности распределения главных рудных и сопутствующих примесных элементов в составе сульфидных руд;
- проанализировать особенности локализации минеральных и геохимических типов руд в контуре основного рудного тела;

- выявить возможные факторы, контролирующие распределение сульфидных руд поля Юбилейное;

- оценить перспективность поля Юбилейное для дальнейшего освоения.

**Фактический материал и методы исследования.** В основу работы положен каменный материал, собранный сотрудниками ВНИИОкеангеология и ПМГРЭ (г. Ломоносов) в ходе 35-го и 36-го рейсов НИС «Профессор Логачев» на территории САХ. Более 100 образцов горных пород изучено автором с помощью бинокулярного микроскопа МБС-1, изготовленные в шлифовальной мастерской ВСЕГЕИ аншлифы – с помощью микроскопа Leica 750 P (Горный университет). Окончательная диагностика минералов, а также изучение их морфологических особенностей выполнены на электронном микроскопе CamScan MV-2300 (аналитик Е.Л. Грузова, ВСЕГЕИ) и JEOL-JSM-6510 LA (аналитик О.Л. Галанкина, ИГГД РАН). Элементный анализ сульфидных руд проводился методами атомной абсорбции в лабораториях ВНИИОкеангеология и Севзапгеология и ICP-MS (ICP-AES) в лаборатории ВИМС с помощью Elan-6100 (Perkin-Elmer) и Optima-4300 DV. ICP-MS анализ был выполнен для 10 основных ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Zn}$ ) и 9 примесных ( $\text{Li}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Cd}$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{Pb}$ ) элементов; ICP-AES – для 47 примесных элементов ( $\text{Li}$ ,  $\text{Be}$ ,  $\text{Sc}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Ga}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Se}$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Y}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{Nb}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{Cd}$ ,  $\text{Sn}$ ,  $\text{Sb}$ ,  $\text{Te}$ ,  $\text{Cs}$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{REE}$ ,  $\text{Hf}$ ,  $\text{Ta}$ ,  $\text{W}$ ,  $\text{Re}$ ,  $\text{Au}$ ,  $\text{Tl}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Bi}$ ,  $\text{Th}$ ,  $\text{U}$ ). Халькопирит поля Юбилейное исследован методом ядерного магнитного резонанса  $^{63}\text{Cu}$  (ЯМР  $^{63}\text{Cu}$ ) на многоимпульсном спектрометре ЯМР/ЯКР Tecmag-Redstone (аналитики В.Л. Матухин, А.И. Погорельцев, А.Н. Гавриленко, С.О. Гарькавый, Казанский государственный энергетический университет).

Соискателем осуществлялась пробоподготовка материала, изучение аншлифов, участие в электронно-микроскопических исследованиях, обработка и интерпретация полученных аналитических данных, обобщение полученных результатов и формулировка выводов.

**Научная новизна:**

- уточнен минеральный состав сульфидных руд гидротермального поля Юбилейное;

- установлены особенности распределения основных рудных и примесных элементов (и их ассоциаций) как промышленно значимых компонентов в сульфидных рудах поля Юбилейное;

- установлена латеральная минералого-геохимическая зональность в контуре рудного тела поля Юбилейное, отражающая ступенчатый процесс рудоотложения;

- выявлены факторы, определяющие минералого-геохимические особенности сульфидных руд и позволяющие интерпретировать закономерности формирования рудных тел поля Юбилейное.

**Практическая ценность.** Полученные данные о минералого-геохимических особенностях сульфидных руд поля Юбилейное позволяют дать оценку его перспективности, необходимую при решении вопроса о первоочередности освоения объектов РРР.

**Достоверность и апробация полученных результатов.** Достоверность полученных результатов обеспечена использованием статистически представительных аналитических данных, сертифицированного аналитического оборудования и современных компьютерных технологий для обработки полученной информации. Результаты исследования опубликованы в 17 печатных работах, включая 3 статьи в журналах из перечня ВАК и 14 публикаций в материалах российских и зарубежных конференций: XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии (Москва, 2015); V Российской молодежной Школы с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования» (Москва, 2015); Научной конференции в Краковской горно-металлургической академии (Краков, Польша, 2015); 11-ом коллоквиуме молодых ученых (Фрайбергская горная Академия, Германия, 2016); Underwater Mining Conference (Берлин, Германия, 2017); Goldschmidt 2017 Conference (Париж, Франция, 2017); Юбилейном съезде Российского минералогического общества «200 лет РМО» (Санкт-Петербург, 2017); VII Российской молодежной Школе с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования» (Москва, 2017).

**Благодарности.** Автор выражает благодарность своему научному руководителю профессору Ю.Б. Марину за помощь в работе над диссертацией. Автор глубоко признателен преподавательскому составу кафедры минералогии, кристаллографии и петрографии СПГУ за конструктивную критику и полезные рекомендации. Особую благодарность автор выражает д.г.-м.н. С.И. Андрееву, д.г.-м.н. Г.А. Черкашеву, к.г.-м.н. С.Ф. Бабаевой, а также сотрудникам ПМГРЭ И.Г. Добрецовой, В.Е. Бельтенеу, И.И. Рождественской за предоставленную возмож-

ность использования фактического материала для подготовки данной работы. Автор выражает огромную признательность сотрудникам ВНИИОкеангеология Т.В. Степановой, И.М. Порошиной, А.В. Фирстовой, М.С. Степановой и коллективу отдела геологии и минеральных ресурсов Мирового океана за ценные материалы, консультации и возможность проведения исследований. Автор выражает благодарность за оказанную помощь в проведении лабораторных исследований Г.А. Олейниковой и Е.Л. Грузовой (ВСЕГЕИ), О.Л. Галанкиной (ИГГД РАН), Е.Г. Ожогойной и С.И. Ануфриевой (ВИМС), В.Л. Матухину (Казанский государственный энергетический университет).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Работа изложена на 137 страницах текста, сопровождается 56 иллюстрациями, 14 таблицами. Список цитируемой литературы включает 155 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ изученности гидротермального сульфидного оруденения на территории РРР в САХ, даны краткая характеристика открытых рудных объектов и обзор основных правил действующего Контракта на разведку океанических сульфидов. Во второй главе рассмотрено геологическое строение рудного поля Юбилейное и особенности его положения в структуре рифтовой долины. Отмечена уникальность сегмента рифтовой долины, в котором находится рудное поле Юбилейное и симметричное ему поле Зенит-Виктория. Третья глава посвящена изучению минералогических особенностей сульфидных руд поля Юбилейное, в ней описаны химические и морфологические особенности главных рудных минералов и предложена схема последовательности минералообразования сульфидных руд.

В четвертой главе руды поля Юбилейное охарактеризованы с использованием принятой в работе рудно-геохимической классификации, отмечены и проинтерпретированы особенности распределения главных и примесных элементов в рудах. Предприняты попытки рассмотреть поведение главных и примесных элементов в контуре рудного тела, с помощью современных методов обработки данных построены схематичные карты распределения элементов в контуре рудного тела, подчеркивающие дифференциацию в распределении разных групп хи-

мических элементов. В пятой главе предложена схема образования сульфидных руд поля Юбилейное, обсуждено зональное строение главного рудного тела поля. Проведен анализ зависимости минералогеохимических особенностей и закономерностей распределения сульфидных руд от эволюции температурного режима рудообразования. В заключении оговариваются основные выводы диссертации.

*Первое защищаемое положение обосновано в главах 3 и 4, второе – в главе 4, третье – в главах 3, 4 и 5.*

## **ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩАЕМЫХ НАУЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ**

***1. В глубоководных сульфидных рудах поля Юбилейное выделяются пиритовый, халькопиритовый и сфалеритовый минеральные типы, разделяющиеся на серно-колчеданный (Fe-S), медно-колчеданный (Cu-Fe) и цинково-колчеданный (Zn-Fe) геохимические типы с устойчивыми ассоциациями рудообразующих элементов.***

Поле Юбилейное представляет собой локальный участок морского дна с двумя рудными телами, локализованными в зоне развития молодых базальтов океанической коры. Гидротермальные образования в пределах контура рудного поля различны по своим морфоструктурным особенностям и включают массивные сульфидные руды, брекчиевидные руды, прожилково-вкрапленное оруденение во вмещающих породах, рудные корки. Главное внимание привлекают массивные руды, имеющие выдержанный минеральный состав.

Главными рудными минералами Юбилейного поля являются пирит, халькопирит, изокубанит и сфалерит; второстепенными – марказит, халькозин, ковеллин, борнит. На основании преобладающего развития какого-либо рудного минерала руды поля разделены на три главных минеральных типа – пиритовый, халькопиритовый и сфалеритовый.

Руды пиритового минерального типа развиты на станциях пробоотбора 35л59, 35л120-35л125, халькопиритового – на станциях 35л59, 35л120-35л122, 35л124, 35л126, сфалеритового – на станциях 35л120 и 35л121 (таблица 1). На некоторых станциях выделяемые минеральные типы совмещены, образуя постепенные переходы с изменением количественных соотношений главных рудных минералов. Так, пространственное совмещение пиритовых и халькопиритовых руд на-

блюдается на станциях 35л59, 35л120, 35л121, 35л122, 35л124, а пиритовых и сфалеритовых – на станциях 35л120, 35л121.

Таблица 1. Минеральная характеристика руд поля Юбилейное

№ станции	Минеральный тип	Объемный процент	Главные рудные минералы
35л59	Халькопиритовый	90	Халькопирит, изокубанит, халькозин, борнит, пирит, марказит
	Пиритовый	10	Пирит, марказит, ± сфалерит, ± халькопирит
35л60	Пиритовый	100	Пирит, марказит, ± сфалерит
35л120	Сфалеритовый	60	Сфалерит, пирит, ± марказит
	Пиритовый	30	Пирит, марказит, ± сфалерит
	Халькопиритовый	10	Халькопирит, пирит, изокубанит, ± борнит, ± тенорит
35л121	Сфалеритовый	60	Сфалерит, пирит, ± марказит
	Пиритовый	40	Пирит, марказит, ± сфалерит
35л122	Пиритовый	60	Пирит, марказит, ± сфалерит, ± халькопирит
	Халькопиритовый	40	Халькопирит, пирит, ± изокубанит, ± сфалерит
35л123	Пиритовый	100	Пирит, марказит, ± сфалерит, ± вторичные сульфиды меди
35л124	Пиритовый	90	Пирит, марказит, ± сфалерит
	Халькопиритовый	10	Халькопирит, пирит, ± марказит
35л125	Пиритовый	100	Пирит, марказит, ± сфалерит, ± халькопирит, оксиды железа
35л126	Халькопиритовый	100	Халькопирит, пирит, ± сфалерит
35л127	Пиритовый	100	Пирит, марказит, ± сфалерит
36л43	Халькопиритовый	100	Халькопирит, пирит

Пирит широко распространен в сульфидных рудах поля Юбилейное. Помимо обособленных крупнокристаллических пиритовых масс и колломорфных образований, наблюдается замещение пиритом пирротина и халькопирита. Пирит встречается в зернах неправильной формы и кубических кристаллах с характерной штриховкой на гранях. Из микропримесей в пирите отмечено присутствие Co в количестве 0.1–1.6 мас.%, Ni до 0.2 мас.%, Se 0.3 мас.% и Cu 0.8–1.3 мас.%.

Часто встречаются в рудах поля халькопирит и изокубанит. В халькопирите содержание Cu варьируется в пределах 30.76–38.48, Fe –



37.86–34.36 мас.%. Химический состав изокубанита близок к теоретическому, однако содержания Cu и Fe колеблются в пределах 20.90–24.41 и 40.54–43.70 мас.% соответственно. Халькопирит образует пластинки (ламели) в основной изокубанитовой массе. Группы параллельных или пересекающихся под углом 60° пластинок образуют решетчатые структуры распада, что свидетельствует о протекании твердофазных превращений в системе изокубанит–халькопирит (Богданов и др., 2015). Получены первые результаты исследования образцов халькопирита из океанических руд методом ядерного магнитного резонанса  $^{63}\text{Cu}$  (ЯМР  $^{63}\text{Cu}$ ) (Матухин и др., 2017). Полученные спектры ЯМР  $^{63}\text{Cu}$  практически совпадают по частоте со спектрами халькопирита из Талнахского месторождения, однако имеют меньшую интенсивность линий, большую ширину и "сложную форму". Это может свидетельствовать о заметном отклонении состава исследованных образцов от стехиометрического.

Сфалерит встречается в виде отдельных столбообразных кристаллов, сплошных масс и колломорфно-слоистых образований. Содержания Zn и Fe колеблются в широких пределах: 48.99–61.45 мас.% и 5.97–14.48 мас.% соответственно.

По результатам исследований предложена схема последовательности минералообразования в рудах поля Юбилейное (рисунок 1).

1. Наиболее ранние сульфидные руды состоят из реликтов пирротина (Po), нередко полностью замещенного пиритом (Py) и оксигидроксидами железа ( $\text{Fe}_x\text{O}_y$ ) при широком развитии опала (Opl) (рисунок 1а).

2. Изокубанит-халькопирит-пиритовые ассоциации с образованием структур распада изокубанит–халькопирит (ScpI+Icbn) характеризуются второстепенным развитием борнита (Bn), халькозина и ковеллина в виде тонких прожилков (рисунок 1б). Аллотриоморфный облик зерен борнита, халькозина и ковеллина, заполняющих трещины и поры, свидетельствует об их позднем образовании. В ассоциациях с халькопиритом встречается высокопробное самородное золото.

3. Халькопиритовые руды сменяются пирит-марказитовыми и пирит-сфалеритовыми (Sp) с единичными зернами галенита и опаловой минерализацией (рисунок 1в). Пирит и подчиненный халькопирит ( $\text{PyII}+\text{ScpII}$ ) в данных ассоциациях представлены скрытокристаллическими агрегатами, тесно сплетенными в сплошную массу (рисунок 1г).

Наличие халькозина, ковеллина, борнита в рудах поля Юбилейное свидетельствует о наличии слабо выраженных зон вторичного обогащения и окисления, аналогичных тем, которые наблюдаются в континентальных колчеданных месторождениях.

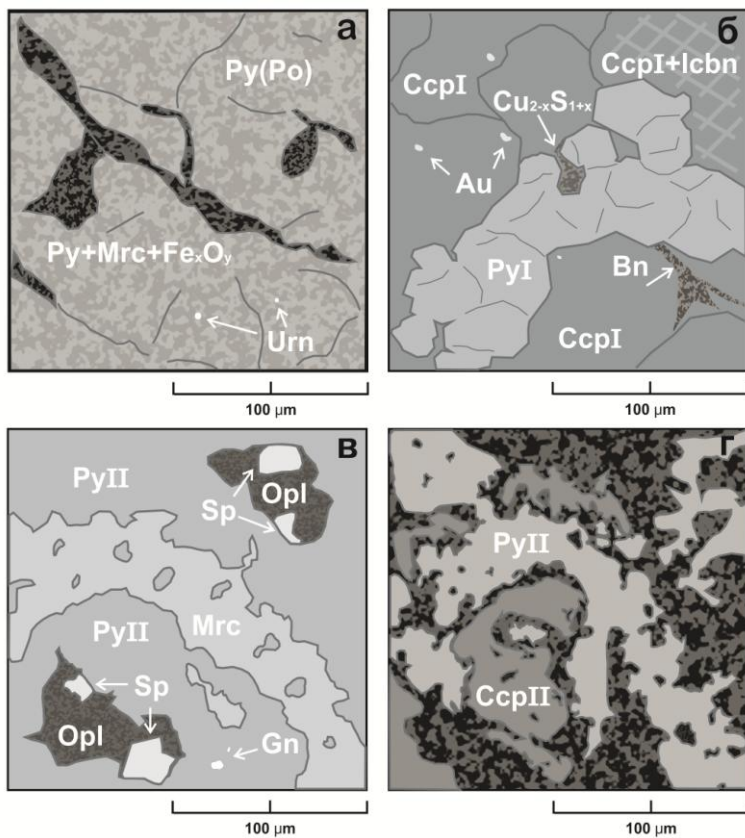


Рисунок 1. Минеральные ассоциации сульфидных руд поля Юбилейное:  
*Po* – пирротин; *Py* – пирит; *Ccp* – халькопирит; *Mrc* – марказит; *Sp* – сфалерит;  
*Icbn* – изокубанит; *Bn* – борнит; *Urn* – уранинит; *Opl* – опал; *Gn* – галенит.

Многолетние исследования привели исследователей к попыткам провести аналогии между океаническими и континентальными колчеданными рудами, однако ряд принципиальных отличий в геологических условиях залегания объектов, типах вмещающих пород, мор-

фологии рудных залежей и минеральном составе не позволяют напрямую пользоваться разработанными для континентальных месторождений классификациями (Краснов и др., 1992; Зайков, 2001; Викентьев, 2004; Зайков, Мелекесцева, 2005; Машковцев и др., 2013; Масленников и др., 2017). В связи с этим на основе изучения рудных объектов Мирового океана коллективом ВНИИОкеангеология разработана классификация (Андреев, 2014), позволяющая определять геохимическую специализацию сульфидных руд. Руды поля Юбилейное характеризуются присутствием следующих геохимических типов:

- серно-колчеданный Fe-S ( $Cu \leq 1\%$ ,  $Zn \leq 2\%$ );
- медно-колчеданный Cu-Fe ( $Cu > 1\%$ ,  $Zn \leq 2\%$ );
- цинково-колчеданный Zn-Fe ( $Zn > 2\%$ ,  $Cu \leq 1\%$ ).

Преобладающими для поля являются Fe-S и Cu-Fe типы. Выделенные геохимические типы руд поля Юбилейное могут быть сопоставлены с установленными минеральными типами и минеральными ассоциациями (таблица 2). Эти соответствия позволяют изучать руды поля комплексно, устанавливая их минералого-геохимические особенности (Суханова, 2017).

Таблица 2 - Соответствие геохимических типов, минеральных типов и минеральных ассоциаций в сульфидных рудах поля Юбилейное

Геохимический тип	Минеральный тип	Минеральная ассоциация
Fe-S	Пиритовый	пиритовая марказит-пиритовая халькопирит-пиритовая
Cu-Fe	Халькопиритовый	пирит-халькопиритовая борнит-халькозин-халькопиритовая марказит-пирит-халькопиритовая
Zn-Fe	Сфалеритовый	пирит-сфалеритовая халькопирит-пирит-сфалеритовая

Среднее содержание Cu для поля Юбилейное составляет 4.73%, Zn – 0.73%. Среднее содержание Cu в халькопиритовых рудах Cu-Fe геохимического типа – 13.7%, содержание Zn в сфалеритовых рудах Zn-Fe геохимического типа – 5.16%. Эти содержания сопоставимы с содержаниями этих элементов в рудных полях, локализованных на базальтах, и ниже содержаний их в рудных полях, ассоциированных с ультраосновными породами.

**2. В сульфидных рудах поля Юбилейное зафиксированы повышенные содержания элементов-примесей Co, Ni, Se, Sb, Cd, Hg,**

**Pb, Ag, Au, образующие три геохимические ассоциации: Fe-Sb-Ni, Cu-Co-Se и Zn-Cd-Ag-Hg-Pb-Au, коррелирующие с установленными минеральными и геохимическими типами.**

Сопутствующими для сульфидных руд химическими элементами, отмеченными зачастую в повышенных концентрациях, являются Ag, Au, Cd, Pb, Co, Ni, Mo, Se, Te и др. (Kotlinski, 2001; Fouquet et al, 2010; Hein et al, 2013; Андреев, 2014). Некоторые из них представляют промышленный интерес. По результатам факторного анализа для сульфидных руд поля Юбилейное определены наиболее проявленные геохимические ассоциации элементов: Fe-S-Sb-Ni, Zn-Cd-Ag-Hg-Pb-Au, Cu-Co-Se, соответствующие конкретным геохимическим типом сульфидных руд (рисунок 2).

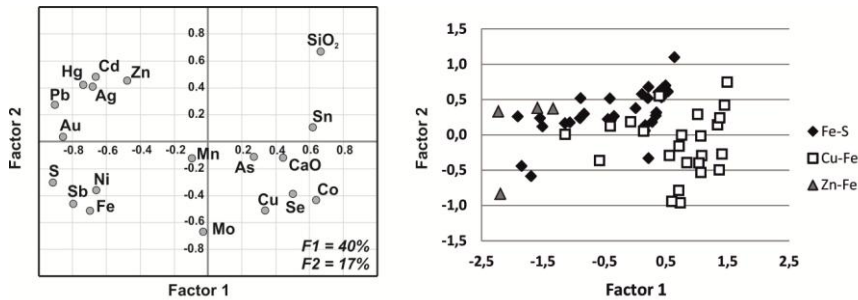


Рисунок 2. График факторных нагрузок (слева) и график значений факторов (справа) для общей выборки сульфидных руд поля Юбилейное

Наличие отрицательных связей между главными рудными компонентами характеризуют антагонизм их поведения, а, следовательно, и обособленность их развития в процессе образования руд поля Юбилейное. Mo, As, Mn, Sn не образуют значимых корреляционных связей с основными элементами изученных руд. Детальное изучение особенностей распределения проведено для каждого элемента, ассоциирующего с рудообразующими металлами (таблица 3). Бинарные графики представлены для кобальта, никеля, кадмия и серебра (рисунок 3).

Общая тенденция распределения элементов-примесей проявляется в том, что медные разновидности сульфидных руд обогащены Co и Se, в то время как цинковые – Cd, Pb, Hg и Ag. Никель и сурьма коррелируют с рудами серно-колчеданной специализации. Изучаемые элементы наблюдаются в качестве изоморфных примесей в составе глав-

ных минералов и в качестве собственных минеральных фаз – миллерита, кобальт-пентландита, кобальтина, галенита, самородного золота с примесью серебра.

Таблица 3 - Среднее содержание рудных и некоторых сопутствующих элементов для различных геохимических типов поля Юбилейное

Тип	Cu	Zn	Co	Se	Ni	Sb	Au	Ag	Cd	Pb	Hg
	%		г/т								
Fe-S	0.39	0.32	193	21.8	46.7	19.5	0.75	16.9	8.39	129	0.87
Cu-Fe	13.7	0.39	1048	94.3	49.4	29.6	0.15	17.4	11.4	75.0	0.50
Zn-Fe	1.56	5.16	351	7.00	47.7	23.2	0.49	45.4	29.1	199	2.45

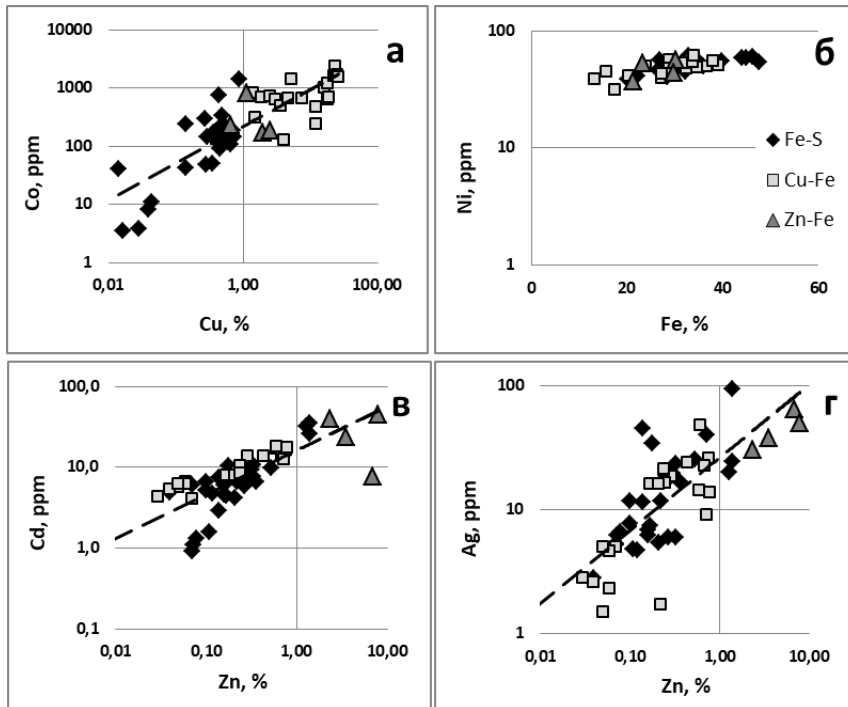


Рисунок 3. Зависимость содержаний кобальта и меди (а), никеля и железа (б), кадмия (в), серебра (г) и цинка в общей выборке сульфидных руд поля Юбилейное

С помощью программы ArcGIS построены схематичные карты распределения содержаний главных рудных и примесных элементов в

контуре рудного тела поля Юбилейное. Учитывая несистемность пробоотбора, при построении схем возникла необходимость использования инструментов интерполяции, входящих в состав программы ArcGIS, для создания непрерывной поверхности на основании имеющихся содержаний элементов в станциях пробоотбора. Установлено, что распределение главных и примесных элементов в контуре рудного тела не равномерно. Особенности распределения меди в контуре рудного тела отражены в постепенном переходе руд с пониженным содержанием меди 1–2% к рудам с высоким содержанием, достигающим 15–20%. Максимумы концентрации меди локализованы в северо-западной и юго-восточной частях рудного тела. Центры с максимальными содержаниями меди и цинка пространственно не совпадают. Распределение содержаний цинка проявляется в смене обедненных цинком руд с содержанием до 1% на периферии рудного тела богатыми цинком (2% и более) рудами.

Максимальные средние содержания Ni приурочены к станциям 35л59 (49.0 г/т) и 35л122 (55.8 г/т). Повышенные концентрации никеля тяготеют к южной части рудного тела. Максимальные средние содержания Sb приурочены к станциям 35л122 (32.4 г/т) и 35л125 (30.2 г/т). Два центра с высоким содержанием сурьмы расположены в южной и северной частях рудного тела. Максимальное среднее содержание Co приурочено к станциям 35л59 (1198 г/т) и 35л124 (1388 г/т). Повышенные концентрации Co тяготеют к северной и южной частям рудного тела. Пространственно участки с повышенным содержанием кобальта не совпадают с участками повышенных содержаний главных рудных компонентов. Это свидетельствует о наличии сложной, не линейной, связи между содержаниями Co и Cu при образовании сульфидных руд.

Максимальное среднее содержание Se приурочено к станциям 35л59 (152 г/т) и 35л126 (155 г/т). Повышенные концентрации Se тяготеют к северо-западной и юго-восточной частям рудного тела. Зоны повышенных содержаний Se пространственно совпадают с зонами распространения высоких содержаний Cu. Максимальные средние содержания Ag, Au, Cd, Pb, Hg приурочены к станции 35л120 (38.7 г/т, 1 г/т, 23.1 г/т, 207 г/т, 2.18 г/т соответственно). Повышенные концентрации этих элементов тяготеют к юго-западной части рудного тела и пространственно совпадают с максимумами для цинка.

**3. Основная тенденция эволюции состава сульфидных руд поля Юбилейное, отражающая падение температуры рудообразования – пространственная смена марказит-пиритовых и халькопиритовых руд с повышенными содержаниями Ni, Co, Se в краевых частях рудного тела сфалеритовыми рудами с высокими содержаниями Cd, Ag, Au, Hg и Pb в центральной части рудного тела.**

Рассмотренные особенности состава сульфидных руд поля Юбилейное фиксируют пространственную дифференциацию минерализации меди, цинка и сопутствующих элементов в контуре главного рудного тела. Наблюдается неравномерное распределение главных рудных и примесных элементов.

Высокие концентрации Zn, Pb, Ag, Cd, Hg и Au находятся в центральной части рудного тела, где развиты сфалеритовые сульфидные руды. Поля высоких концентраций цинка вытянуты по простиранию бровки рифтовой долины, на которой расположено рудное тело. Отношение Cu/Zn в рудах составляет 0.85-0.95, что обусловлено подчиненным развитием медных руд относительно цинковых. Эти руды сменяются рудами с высокими содержаниями Cu, Co и частично Se. Отношение Cu/Zn возрастает в десятки раз. Максимумы концентраций Cu, Co и Se разобщены с максимумами цинка и вытянуты в северо-западном направлении.

Краевые части рудного тела представлены преимущественно пиритовыми сульфидными рудами без аномально высоких содержаний примесных элементов.

Подобная дифференциация проявляется в установленной последовательности образования изучаемых сульфидных руд (таблица 4) и отражает рудообразование при различном температурном режиме среды. Экспериментально установлено, что цинк и ассоциирующие с ним компоненты (Cd, Pb, Hg, Ag) отлагаются при температурах ниже, чем Cu, Co, Se (Hannington, Scott, 1988; Tivey et al., 1995). Можно предположить, что для главных рудных компонентов и элементов, с ними ассоциирующих, имеет место латеральная зональность распределения их содержаний в контуре рудного тела поля Юбилейное.

По аналогии с континентальными колчеданными месторождениями предприняты попытки установить ряд зонального отложения главных и примесных элементов в направлении падения температуры:

Fe – Cu – Co (+Se, Au) – Zn (+Cd, Ag, Hg, Au) – Pb.

Выявленные особенности, условно названные минералогеохимической зональностью, согласуются с представленными далее условиями формирования сульфидных руд.

Таблица 4 - Температурные парагенетические ассоциации главных рудных минералов поля Юбилейное

Минерал	400-300°C	300-200°C	200-100°C
Пирротин	■		
Пирит	■	■	■
Изокубанит	■		
Халькопирит	■	■	
Сфалерит		■	■
Марказит		■	■
Борнит			■
Халькозин			■
Ковеллин			■

Примечание: жирная черная линия – минерал формируется и преобладает на данной стадии, средняя черная линия – преобладает на данной стадии, серая линия – встречается редко

Сульфидные руды поля Юбилейное сформировались в условиях активного вулканизма под влиянием малоглубинных магматических очагов на территории развития молодого базальтового комплекса океанической коры благодаря высокотемпературным рудоносным растворам, быстро поднимающимся к морскому дну вдоль разломов, формирующих крутые склоны рифтовой долины. Холодная морская вода просачивается вниз вдоль трещин во вмещающих породах на глубину примерно до 2 км, дальше породы становятся плохо проницаемыми. На такой глубине за счет вулканического тепла вода нагревается до 350°C и вступает в реакцию с вмещающими базальтами, заимствуя рудные компоненты и формируя высокотемпературный гидротермальный раствор (рисунок 4).

Изучение химического состава сульфидных руд показало, что содержания редкоземельных элементов (РЗЭ) в целом не зависят от минерального состава руд и принадлежности их к определенным рудно-геохимическим типам. Вместе с тем, РЗЭ могут быть индикаторами источника рудного вещества. Генетическое родство изучаемых суль-



фидных руд и рудоносного раствора, поступающего из вмещающих пород, доказываемая спектрами распределения РЗЭ.

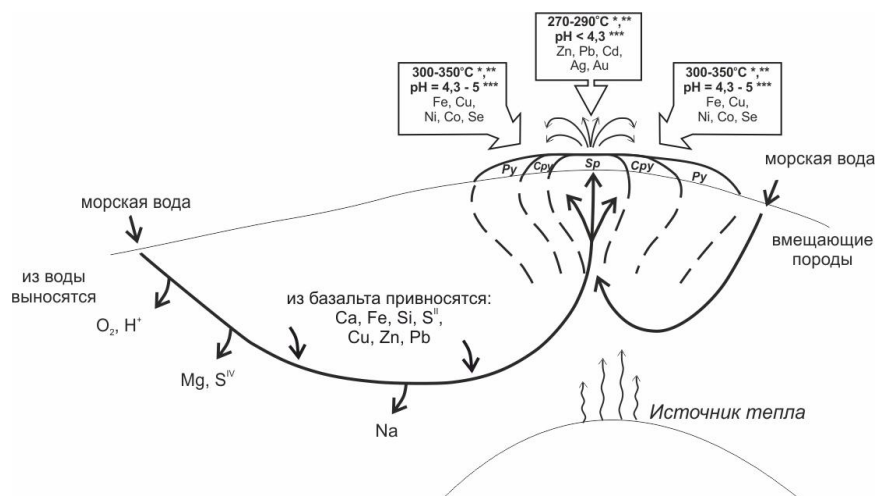


Рисунок 4. Схематичная модель образования основного рудного тела поля Юбилейное, составленная по данным (Краснов и др., 1992; Гричук, 1999) с дополнениями автора. Используются данные по температуре и pH среды образования: \* Solomon, 1976; \*\* Vikentyev, 1995, \*\*\* Houghton et al, 2003.

Полученные автором спектры распределения РЗЭ в сульфидных рудах, вмещающих породах и экспериментальные графики распределения редкоземельных элементов в гидротермальном рудоносном растворе (Deborah, 1998) характеризуются наличием общей для всех спектров хорошо выраженной положительной европиевой аномалией и явным преобладанием легких РЗЭ над тяжелыми. Отмеченная положительная аномалия в породах и рудах свидетельствует о перераспределении исходного вещества в гидротермальном процессе. Сходные спектры распределения РЗЭ в сульфидных рудах, гидротермальных рудоносных растворах и вмещающих породах обуславливают генетическую связь сульфидов с нагретыми растворами, воздействующими на вмещающие породы.

Высокотемпературная среда рудообразования является благоприятной для образования в первую очередь сульфидов Cu и Fe, обогащенных Co, Ni и Se, которые распространяясь на некоторое расстояние от центра разгрузки, обогащают краевые части сульфидной залежи (ри-

сунок 4). Богатые цинком руды формируются при постепенном понижении температуры, что способствует образованию Zn минерализации с сопутствующими примесными компонентами. В данных условиях миграция рудного раствора на большие расстояния от центра разгрузки затруднительна, что отражается на ограниченном распределении цинковых руд с высокими содержаниями Cd, Pb, Hg, Ag и Au.

Однозначно определить, где находится главный рудовыводящий канал, или ответить на вопрос, сколько было каналов, нельзя. Имеющийся фактический материал позволяет предполагать, что основное место разгрузки рудоносного раствора могло пространственно совпадать с зоной развития сфалеритовых сульфидных руд.

Геохимическая зональность рудного тела является отражением последовательного отложения сульфидов из рудообразующего раствора, эволюционировавшего по мере понижения температуры в направлении уменьшения Cu/Zn отношения. Предложенная модель формирования основного рудного тела поля Юбилейное согласуется с данными термодинамического моделирования эволюции рудообразующих растворов, представленными в работе Дж.М. Франклина (Франклин и др., 1984), установившего, что руды с высоким отношением Cu/Zn отлагались при более высоких температурах по сравнению с рудами с низким отношением Cu/Zn.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате комплексного анализа минералого-геохимических особенностей сульфидных руд поля Юбилейное установлена основная тенденция эволюции их состава, отражающая падение температуры рудообразования – пространственная смена марказит-пиритовых и халькопиритовых руд с повышенными содержаниями Ni, Co, Se в краевых частях рудного тела сфалеритовыми рудами с высокими содержаниями Cd, Ag, Au, Hg и Pb в центральной части тела. Предложена модель формирования основной рудной залежи поля Юбилейное, в которой есть предположительный магматический очаг, источник рудного вещества, рудовыводящая структура и геодинамическая ловушка для накопления рудных элементов.

Несмотря на заявленную комплексность изучения сульфидных руд, некоторые аспекты раскрыты не в полной мере. В связи с этим,

необходимо отметить перспективность дальнейшего изучения океанических сульфидов, в том числе методом LA-ICP, определения возраста руд и уточнения стадийности их образования, анализа изотопного состава серы для уточнения источника рудного вещества.

По комплексу установленных минералого-геохимических особенностей рудное поле Юбилейное занимает промежуточное положение между объектами PPP, обогащенными и обедненными попутными компонентами (Ni, Co, Se, Cd, Pb, Ag, Au), и может, по предварительным оценкам, рассматриваться для последующего освоения в совокупности с близлежащими рудными участками.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В журналах из перечня ВАК при Минобрнауки России:**

1. Babaeva S.F. Comparison of deep-sea sulfides located symmetrically east and west of the Mid-Atlantic ridge rift valley / S.F. Babaeva, **А.А. Sukhanova**, J.R. Hein, S.I. Andreev // Записки РМО. – 2017. – Вып. 6. – С. 18-42.
2. Андреев С.И. Комплексы редкометалльных элементов в составе гидротермальных сульфидных руд Мирового океана / С.И. Андреев, С.Ф. Бабаева, В.Е. Казакова, Н.Л. Колчина, **А.А. Суханова**, А.В. Фирстова, С.И. Ануфриева, И.Г. Луговская // Руды и металлы. – 2017. – Вып. 4. – С. 102-111.
3. Матухин В.Л. Исследования полупроводникового минерала  $\text{CuFeS}_2$  из гидротермальных отложений океанского рифта методом ЯМР Си в локальном поле / В.Л. Матухин, А.И. Погорельцев, А.Н. Гавриленко, С.О. Гарькавый, Е.В. Шмидт, С.Ф. Бабаева, **А.А. Суханова**, Е.И. Теруков // Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т. 51. Вып. 1. – С. 8-11.

### **В других изданиях:**

1. Бабаева С.Ф. Геохимические особенности и источник кобальта и никеля в рудах САХ / С.Ф. Бабаева, **А.А. Суханова** // Минералогия во всем пространстве сего слова. Материалы XII Съезда Российского минералогического общества 2015. СПб. – 2015. – С. 79-80.
2. Бабаева С.Ф. Селен и кобальт в системе Cu-Fe-S океанических массивных сульфидных руд, САХ / С.Ф. Бабаева, **А.А. Суханова** // Геология морей и океанов: Материалы XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. М.: ГЕОС. – 2015. – С. 117-120.

3. **Суханова А.А.** Геохимические особенности кобальта и никеля в медных рудах гидротермальных полей Ашадзе-1 и Юбилейное (САХ) / А.А. Суханова // *Материалы Пятой Российской молодежной Школы с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования»*, М.: ИГЕМ РАН. – 2015. – С. 225-227.
4. **Суханова А.А.** Закономерности распределения и особенности минеральных и геохимических типов сульфидных руд полей Юбилейное и Зенит-виктория (Срединно-Атлантический хребет) / А.А. Суханова, С.Ф. Бабаева, С.И. Андреев // *Комплексные исследования Мирового океана. Материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых*, М.: ИО РАН. – 2017. – С. 528-529.
5. Бабаева С.Ф. Минеральные парагенетические ассоциации, разновидности и типы океанических сульфидных руд Срединно-Атлантического хребта / С.Ф. Бабаева, **А.А. Суханова**, С.И. Андреев // *Материалы Юбилейного съезда Российского минералогического общества «200 лет РМО»*, СПб. – 2017. – С. 187-189.
6. **Суханова А.А.** Особенности классификации океанических сульфидных руд при выборе потенциально перспективных объектов РРР-ГПС-САХ / А.А. Суханова, С.Ф. Бабаева, С.И. Андреев // *Материалы Российской молодежной Школы «Новое в познании процессов рудообразования»*, М.: ИГЕМ РАН. – 2017. – С. 277-278
7. Babaeva S. Geochemical types of sulfide ore as indicators of mineral evolution at the hydrothermal vent field Jubileynoye (MAR) / S. Babaeva, **A. Sukhanova**, S. Andreev // *Abstracts UMI, Lisbon*. – 2014. – P. 45-54.
8. Babaeva S. Origin of Co and Ni in Cu-rich seafloor massive sulfides / S. Babaeva, **A. Sukhanova**, S. Andreev // *Abstracts UMC, Florida, USA*. – 2015. – P. 31-42.
9. **Sukhanova A.** Mineralogical and geochemical typification of hydrothermal sulfide ores of South group in Russian Exploration area, Mid-Atlantic Ridge / A. Sukhanova, S. Babaeva // *Scientific Reports on Resource Issues*. TU Bergakademie Freiberg, Germany. – 2016. – P. 22-27.