

## ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЕ РАБОТЫ НА ГЛУБОКОВОДНЫЕ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ СУЛЬФИДЫ В ОСЕВОЙ ЗОНЕ СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА: РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В РОССИЙСКОМ РАЗВЕДОЧНОМ РАЙОНЕ

Г. А. Черкашѐв<sup>1,2</sup>, В. Е. Бельтенѐв<sup>1</sup>, И. В. Егоров<sup>1</sup>, Л. А. Ермакова<sup>1</sup>,  
Н. Л. Колчина<sup>1</sup>, А. В. Кондратенко<sup>1</sup>, А. В. Фирстова<sup>1</sup>, А. С. Сотникова

<sup>1</sup>*Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов  
Мирового океана им. акад. И. С. Грамберга (ВНИИОкеангеология),  
Россия, 190121, г. Санкт-Петербург, Английский пр., д. 1,  
e-mail: v.belt@yandex.ru;*

<sup>2</sup>*Санкт-Петербургский государственный университет – Институт наук о Земле,  
Россия, 199134, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9,  
e-mail: gcherkashov@gmail.com*

Представлен обзор российских исследований глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС) в осевой зоне Срединно-Атлантического хребта (САХ) на площади Российского разведочного района (РРР–ГПС). Дана краткая геологическая характеристика осевой зоны САХ и рудных объектов, открытых и изученных в течение почти 40 лет до и после подписания контракта на проведение разведочных работ с Международным органом по морскому дну в 2012 г. Изложены данные по методам проведения поисков и разведки ГПС, техническим средствам, а также по металлургической переработке сырья.

**Ключевые слова:** глубоководные полиметаллические сульфиды, Срединно-Атлантический хребет, Российский разведочный район, рудный узел, рудное поле, геологоразведочные работы, Международный орган по морскому дну

### Введение

Гидротермальные сульфидные руды («массивные сульфиды», «глубоководные полиметаллические сульфиды») являются третьим типом глубоководных полезных ископаемых наряду с железомарганцевыми конкрециями и кобальтомарганцевыми корками, имеющим глобальное распространение и значительные ресурсы, которые определяют его научное и экономическое значение. Располагаясь преимущественно в пределах Международного района морского дна вне пределов национальной юрисдикции, сульфидные руды являются объектом контроля со стороны Международного органа по морскому дну (МОМД), который уполномочен ООН регулировать проведение геологоразведочных и добычных работ на все три типа упомянутых полезных ископаемых.

Отечественные научно-исследовательские, а затем геологоразведочные экспедиционные работы по проблеме глубоководных полиметаллических сульфидов

(ГПС) организациями Министерства геологии СССР, начались в 1985 году. Ведущая роль в этих работах принадлежала в первую очередь ФГУП «ВНИИОкеангеология» (в настоящее время ФГБУ «ВНИИОкеангеология») и ФГУНПП «ПМГРЭ» (в настоящее время АО «ПМГРЭ»). Конечной задачей было выявление в Международном районе морского дна наиболее перспективных рудных объектов с целью дальнейшего их изучения и возможного освоения в соответствии с Международной Конвенцией по морскому праву. На начальном этапе изучение глубоководных полиметаллических сульфидов проводилось в районе Восточно-Тихоокеанского поднятия, а с 90-х годов прошлого века работы были сосредоточены в осевой зоне Срединно-Атлантического хребта (САХ).

Руководствуясь «Правилами поиска и разведки полиметаллических сульфидных руд в Международном Районе», принятыми МОМД в 2010 г., ФГУП «ВНИИОкеангеология» и ФГУНПП «ПМГРЭ» подготовили «Заявку на утверждение плана работы по разведке полиметаллических сульфидов для получения контракта», которая была рассмотрена и одобрена Советом МОМД в июле 2011 г. В 2012 г. между МОМД и Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации был подписан пятнадцатилетний контракт на разведку полиметаллических сульфидов (далее – Контракт). На основании Контракта Российской Федерации было предоставлено исключительное право на разведку полиметаллических сульфидов в северной приэкваториальной зоне САХ (Контракт, 2012).

## **Результаты геологоразведочных работ на глубоководные полиметаллические сульфиды на площади Российского разведочного района (PPP–ГПС)**

### ***Общая информация***

На начальном этапе экспедиционные исследования проводились на трех научно-исследовательских судах – «Геолог Ферсман», «Севморгеология» и «Профессор Логачев». С начала 90-х годов НИС «Профессор Логачев» стало основным научно-исследовательским судном, на котором до настоящего времени проводятся экспедиционные работы (рисунок 1).

Геолого-геофизические работы на ГПС характеризуются следующей стадийностью, определенной методическими документами (Методические рекомендации, 2019):

- региональная стадия;
- рекогносцировочная стадия масштаба 1:1 000 000–1:500 000;
- детализационная стадия масштаба 1:200 000–1:100 000;
- поисковая стадия, включающая общепойсковую (масштаб 1:50 000–1:25 000) и детализационную подстадии (масштаб 1:25 000–1:10 000).

После завершения поисковые работы сменяются оценочными и разведочными.



Рис. 1 – НИС «Профессор Логачев»

На начальном этапе проводились опытно-методические работы в соответствии с методикой региональных исследований и отбора проб сульфидных руд. В ходе региональных работ масштаба 1:1 000 000–1:500 000 был изучен осевой отрезок САХ от 6° с. ш. до 29° с. ш., получены данные о геофизических полях, гидрологическом строении водной толщи и геологическом строении океанского дна. В результате анализа данных были выделены перспективные площади на обнаружение ГПС. Опытные-методические работы по отбору проб сульфидных руд проводились на известных рудных полях Снейк Пит и ТАГ.

При проведении работ применялись следующие основные виды исследований:

- гидролокация бокового обзора (ГБО, сонарная съемка) и геоакустическое профилирование с комплексом «ORETECH-M», в дальнейшем с комплексом «МАК-1М» (разработан в ГНЦ Южморгеология);
- гидрологические с применением CTD SBE 911plus;
- электроразведочные с применением глубоководного буксируемого комплекса АМК «РИФТ» (разработан в ГП «Севморгео»);
- геологический пробоотбор скальной драгой, гравитационной трубкой, боксером, виброударной установкой ДИП «Океан», телегрейферами «Пройссаг» и «ДГ-1».

При поисках ГПС наиболее эффективным оказался электроразведочный метод, применяемый и в разведке колчеданов на суше – древних аналогов современных океанских руд. Потенциал естественного электрического поля (ЕП) измерялся в придонных горизонтах водной толщи. Опыт проведенных работ показал, что выявляемые

аномалии ЕП связаны с сульфидными проявлениями на океанском дне. В дальнейшем специалистам ПМГРЭ технически удалось совместить проведение профильных работ ГБО с измерением естественного электрического поля, что позволило значительно повысить эффективность работ и сэкономить судовое время.

### *Геологическое строение*

Российский разведочный район глубоководных полиметаллических сульфидов находится в северной приэкваториальной части Атлантического океана на отрезке осевой зоны САХ в интервале широт  $12^{\circ}48'36''$ - $20^{\circ}54'36''$ с. ш. Общая протяженность района составляла 897 км; изначально район состоял из 100 разведочных блоков размером  $10 \times 10$  км.

Район расположен в пределах двух крупных сегментов первого порядка, ограниченных трансформными разломами Кейн ( $23^{\circ}35'$  с. ш.), Зеленого Мыса (или разлом  $15^{\circ}20'$  с. ш.) и Марафон (рисунок 2). Эти сегменты, в свою очередь, разделяются на отрезки (сегменты второго порядка) длиной от 15 до 75 км, обладающие определенной внутренней однородностью и имеющие достаточно выраженные границы (в большинстве случаев – нетрансформные смещения рифтовой долины). В общей сложности в пределах данного отрезка САХ выделено 24 сегмента второго порядка: 11 – между разломом Марафон и разломом Зеленого Мыса и 13 – между разломами Кейн и Зеленого Мыса. Сегменты отчетливо разделяются на «магматические» и «тектонические», характеризующиеся соответствующей эндогенной направленностью и, в связи с этим – определенной спецификой рельефа (Мировой океан, 2018).

*Магматические* сегменты расположены преимущественно в северной части района от  $18^{\circ}$  до  $21^{\circ}$  с. ш. и в соответствии с названием характеризуются преобладанием вулканических процессов над тектоническими. Для них характерно симметричное (от оси спрединга) ритмичное линейно-грядовое фланговое строение и относительно узкое днище долины (в основном, до 10 км) с высокими крутыми бортами (до  $50^{\circ}$ ).

*Тектонические* сегменты преимущественно составляют южную часть РРР к югу от  $18^{\circ}$  с. ш. Их главной отличительной особенностью является интенсивное проявление феномена внутренних океанических комплексов (ВОК) – блоков глубинных пород габбро-перидотитовой ассоциации, выведенных в процессе длительного амагматического растяжения литосферы на океанское дно вдоль крупных, преимущественно пологих, разломов (детачментов). Внутренние океанические комплексы в районах их развития являются основным фактором, влияющим на морфоструктуру дна, в связи с чем такие сегменты отличаются ассиметричным относительно оси спрединга строением. Протяженность отдельных ВОК вдоль рифтовой долины достигает 35 км. Рифтовая долина в пределах тектонических сегментов выражена нечетко, ширина днища при этом достигает 15 км.

Вулканические породы района представлены толеитовыми базальтами. В ходе изучения базальтового магматизма по петрохимическим параметрам было выделено две основные ассоциации толеитовых базальтов – спрединговая и плюмовая

(Дмитриев, 1990; 1998; 1999; 2000). В сегменте между разломами Кейн и Зеленого Мыса большинство рудных полей связано с вулканическими породами спрединговой ассоциации. Исключением является рудный узел Победа, расположенный в «амагматичном» сегменте второго порядка и приуроченный к глубинным породам габбро-перидотитового комплекса.

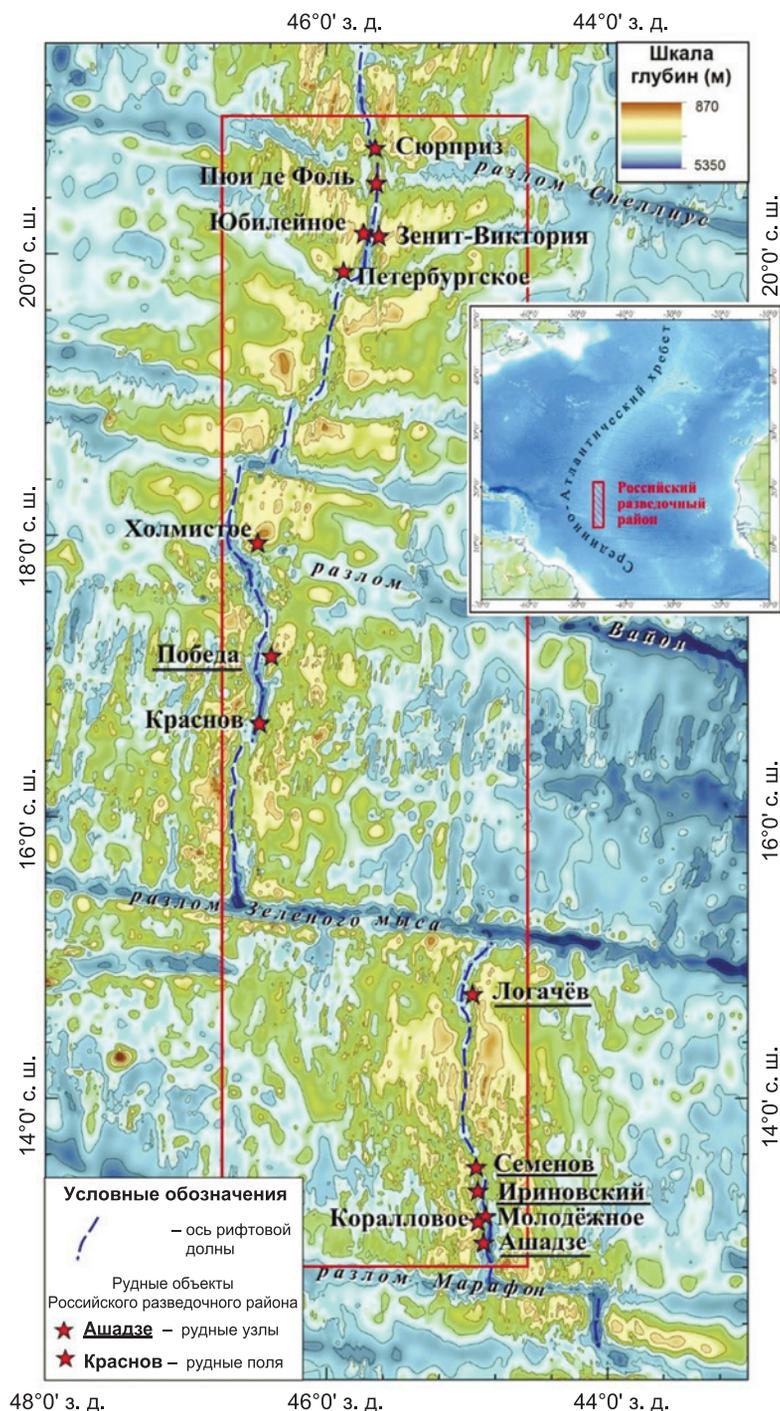


Рис. 2 – Обзорная схема Российского разведочного района

Мантийные породы внутренних океанических комплексов представлены в различной степени серпентинизированными гарцбургитами, реже лерцолитами и дунитами. Нижнекоровые породы – широким спектром габброидов, от оливиновых до рудных габбро, в большинстве которых обнаруживаются признаки амфиболитовой и зеленосланцевой фаций метаморфизма. В южной части района между разломами Марафон и Зеленого Мыса все выявленные рудные объекты связаны с мантийными и нижнекоровыми породами габбро-перидотитового комплекса (ВОК) и расположены в сегментах с преобладанием амагматического процесса растяжения литосферы (рисунок 3).

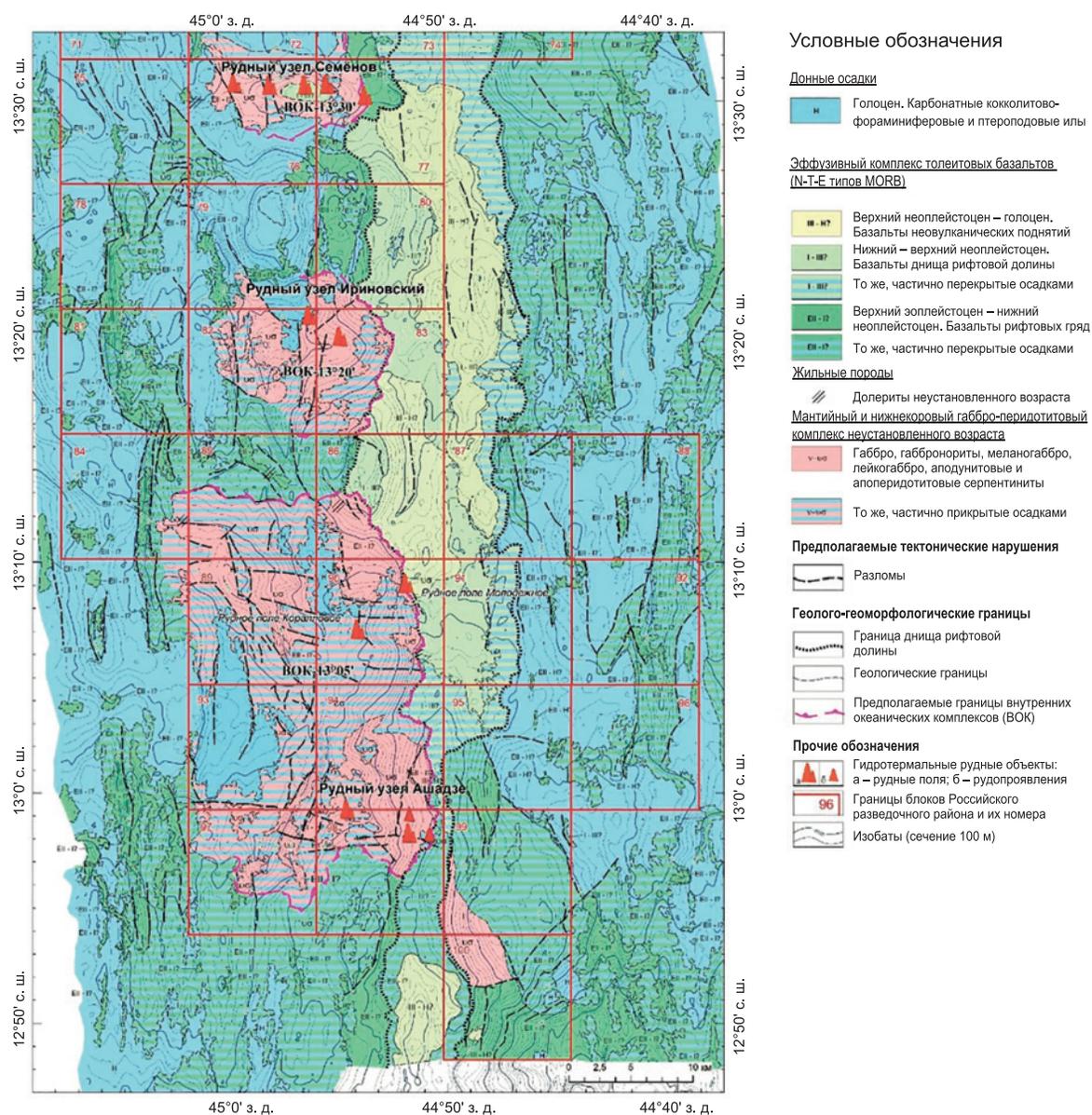


Рис. 3 – Геологическая карта. Отрезок САХ – 12°48' с. ш. – 13°32' с. ш.

Донные осадки в пределах всего района представлены биогенными карбонатными илами, сменяющимися пелагическими глинами на глубинах ниже уровня карбонатной компенсации. Донные осадки преимущественно распространены на флангах хребта, но также фрагментарно накапливаются и в депрессиях днища рифтовой долины.

### *Основные результаты геологоразведочных работ в РРР–ГПС*

В соответствии с Контрактом план работ по разведке ГПС состоит из трех последовательных этапов, ориентированных на получение следующих результатов:

I-й этап (продолжительность 6 лет). Выявление первоочередных перспективных районов для проведения более детальных разведочных работ;

II-й этап (продолжительность 5 лет). Выявление конкретных рудных объектов и оценка потенциальных ресурсов слагающих их руд;

III-й этап (продолжительность 4 года). Разведка промышленно значимых рудных объектов с подсчетом запасов и выделение добычного района.

В российской геологоразведочной практике эта этапность примерно соответствует поисковой, оценочной и разведочной стадиям работ.

Всего к 2024 г. на научно-исследовательских судах ПМГРЭ проведено 32 морские экспедиции, из них 27 – в пределах Российского разведочного района.

К моменту подписания контракта с МОМД в 2012 г. были открыты и предварительно изучены 14 гидротермальных рудных поля и 5 рудопроявлений (рудопроявление Логачев–6 открыто после заключения контракта), часть из которых объединены в рудные узлы).

После подписания Контракта было выполнено 7 рейсов на НИС «Профессор Логачев», открыты рудные поля Юбилейное, Сюрприз, Холмистое, Молодежное, Коралловое и рудный узел Победа (таблица 1, рисунок 2).

К настоящему времени в пределах РРР–ГПС завершены геологоразведочные работы поисковой стадии (в российской терминологии). В результате проведенных исследований открыто 23 рудных поля и 6 рудопроявлений. Два рудных поля открыты зарубежными специалистами – Пюи де Фоль (Gente et. al., 1996) и Ириновское-1 (McLeod et. al., 2009), остальные рудные объекты имеют российский приоритет открытия.

Кроме АО «ПМГРЭ» и ФГБУ «ВНИИОкеангеология» геологические исследования в пределах РРР–ГПС проводились рядом институтов Академии наук (ИО РАН, ГЕОХИ РАН, ИГЕМ РАН и ГИН РАН). Эти исследования носили фундаментальный характер и были направлены на изучение геологического строения САХ и уже открытых гидротермальных рудных объектов. Кроме того, исследования гидротермальных полей в пределах РРР–ГПС проводились и зарубежными учеными (GЕОМАR, Германия, 2006, 2014; IFREMER, Франция, 2007, 2013 и др.), в т. ч. с постановкой бурения и использованием необитаемых глубоководных аппаратов (Fouquet et. al., 2008; Jameison et. al., 2014). Помимо самостоятельных академических экспедиций в рейсах

НИС «Профессор Логачев» за период исследований участвовали многие сотрудники РАН (ГИН, ИГЕМ, ГЕОХИ, ИО, Института минералогии УрО РАН), СПбГУ, а также зарубежные эксперты из IFREMER (Франция) и COMRA (Китайская Народная Республика).

Табл. 1 – Рудные объекты в пределах Российского разведочного района, открытые в рейсах НИС «Профессор Логачѐв»

№ п/п	Рудный объект	Год открытия	№ рейса	Рудовмещающие породы
<i>Открыты до заключения Контракта</i>				
1	Рудный узел Логачев (14°45' с. ш.), включает 2 рудных поля и 4 рудопроявления	1993–1994	7, 10	Габбро-перидотиты
2	Рудный узел Ашадзе (12°58' с. ш.), включает 2 рудных поля и 2 рудопроявления	2003–2005	22,26	Габбро-перидотиты
3	Рудное поле Краснов (16°38' с. ш.)	2006	24	Базальты
4	Рудный узел Семенов (13°31' с. ш.), включает 5 рудных поля	2007–2009	30,32	Габбро-перидотиты
5	Рудное поле Зенит-Виктория (20°08' с. ш.)	2008	31	Базальты
6	Рудное поле Пюи де Фоль* (20°30' с. ш.)	1996	31	Базальты
7	Рудное поле Петербургское (19°52' с. ш.)	2010	33	Базальты
8	Рудный узел Ириновский** (13°20' с. ш.), включает 2 рудных поля	2011	34	Габбро-перидотиты
<i>Открыты после заключения Контракта</i>				
9	Рудное поле Юбилейное (20°09' с. ш.)	2012	35	Базальты
10	Рудное поле Сюрприз (20°45' с. ш.)	2012	35	Базальты
11	Рудное поле Холмистое (17°57' с. ш.)	2014	37	Базальты
12	Рудный узел Победа (17°08' с. ш.), включает 3 рудных поля	2014–2015	37	Габбро-перидотиты
13	Рудное поле Молодежное (13°09' с. ш.)	2020	41	Габбро-перидотиты
14	Рудное поле Коралловое (13°07' с. ш.)	2020	41	Габбро-перидотиты

Примечание: \* – рудное поле открыто IFREMER (Gente P. et. al., 1996), изучалось ФГУНПП «ПМГРЭ» в 2008, 2015 гг.

\*\* – первые образцы ГПС в районе рудного поля Ириновское-1, получены в 2007 г. в британской экспедиции на НИС James Cook (McLeod et. al., 2009).

Всего в пределах PPP–ГПС открыто 23 рудных поля и 6 рудопроявлений.

Аналитические исследования отобранных в рейсах образцов гидротермальных образований, горных пород и донных осадков проводились в стационарных лабораториях различных организаций.

При аналитических исследованиях в составе сульфидных руд и гидротермальных образований определялись элементы, которые условно можно разделить на четыре категории:

- основные рудные элементы: Cu, Zn, Fe;
- породообразующие элементы: Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, V, Mn, S;
- попутные элементы: Au, Ag, Pb, Cd, Co, Ni;
- элементы примесного состава: Se, Te, As, V, Cr, Ga, Mo, Sn, Ba, W, Th, U, Sb, As, Ge, Se, In, Te, Bi.

Изучение минерального состава руд выполнялось методами оптической микроскопии (минераграфический, оптико-минералогический, оптико-петрографический) и рентгенографическим фазовым анализом.

В горных породах проводилось определение породообразующих окислов ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), рудных ( $\text{Cu}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Ni}$ ), примесных и РЗЭ элементов.

При изучении донных осадков определялись гранулометрический состав, содержания  $\text{C}_{\text{карб.}}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Co}$ , дополнительно содержания РЗЭ в металлоносных осадках рудных полей.

Проводились определения абсолютного возраста сульфидных руд и донных осадков  $\text{U/Th}^{230}$  методом, а также изотопов свинца методом термоионизационной масс-спектрометрии (TIMS) в горных породах и сульфидных рудах.

Глубоководные полиметаллические сульфиды характеризуются гетерогенным составом. Главными рудными минералами являются пирит, халькопирит, сфалерит, изокубанит и марказит; второстепенными – пирротин, борнит, ковеллин, халькозин, дигенит и другие нестехиометрические сульфиды меди. К одной из особенностей состава современных гидротермальных сульфидных руд можно отнести большое разнообразие редких минералов кобальта и никеля (кобальтин, миллерит и др.), висмута (висмутин, самородный висмут), самородное золото, электрум, селениды и теллуриды золота, серебра и свинца (калаверит, гессит, клаустолит) (Firstova et al., 2016; Firstova et al., 2019). По геохимической специализации ГПС подразделяются на серно-колчеданные, медно-колчеданные, медно-цинково колчеданные, цинково-медно колчеданные и медные руды.

Руды, приуроченные к породам габбро-перидотитового комплекса, характеризуются повышенными содержаниями главных ( $\text{Cu}$ ,  $\text{Zn}$ ), попутных ( $\text{Au}$ ,  $\text{Ag}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Co}$ ) и примесных ( $\text{Se}$ ,  $\text{Te}$ ,  $\text{In}$ ,  $\text{Bi}$ ,  $\text{Ge}$ ) элементов в то время как руды, приуроченные к толеитовым базальтам, преимущественно имеют серно-колчеданный состав без повышенных содержаний основных и попутных элементов.

В ходе исследований ГПС по договорам с ФГУП «ЦНИГРИ» были проведены технологические исследования четырех проб глубоководных полиметаллических сульфидов, отобранных в рейсах НИС «Профессор Логачев» на рудных полях Ашадзе-1, Пюи де Фоль, Семенов-2 и Юбилейное (Бельтнев и др., 2008, 2010; Добрецова и др., 2019).

Была разработана и рекомендована к внедрению комбинированная гидрометаллургическая технология, включающая окислительно-сульфатизирующий обжиг руды при температуре 550–650 °С и выщелачивание полезных компонентов из огарка в продуктивные растворы с последующим их извлечением в товарные продукты.

Исследованы два варианта гидрометаллургической переработки огарка:

- выщелачивание слабым раствором серной кислоты;
- солевое выщелачивание в присутствии окислителей.

При сернокислотном выщелачивании в раствор переводится 96.6–99.5 % содержащихся в огарке меди, цинка и кобальта. Золото и серебро остаются в кеке выщелачивания, из которого они в последующем извлекаются цианированием.

В 2014 г. по договору между ФГУНПП «ПМГРЭ» и ФГУП «ВИМС» были выполнены работы по обеспечению методического сопровождения лабораторных исследований вещественного состава и свойств ГПС. На основе аналитических исследований разработан оптимальный комплекс современных минералого-аналитических методов исследования вещественного состава и свойств ГПС и подготовлены стандарты на основе сульфидных руд полей Петербургское и Ириновское (Рождественская и др., 2014).

Начиная с 2012 г., при проведении поисковых работ проводились систематические инженерно-геологические исследования в полевых и стационарных условиях.

В судовой лаборатории изучались физические свойства (влажность и плотность образцов) гидротермальных образований (сульфидные руды и корки) и вмещающих пород, физико-механические свойства донных осадков (влажность, плотность грунта, сопротивление вращательному срезу, остаточная прочность и удельное сопротивление пенетрации). В стационарной лаборатории выполнялись определения параметров физико-механических свойств гидротермальных образований и вмещающих пород (влажность и плотность породы, пределы прочности на сжатие и растяжение, модули упругости и остаточной деформации), а также плотность частиц грунта донных осадков пикнометрическим методом.

После комплексной обработки и обобщения инженерно-геологических материалов, полученных на борту судна и в стационарной лаборатории, на основе разрабатываемой в ФГБУ «ВНИИОкеангеология» методики инженерно-геологических исследований глубоководных гидротермальных рудных объектов, проводится оценка инженерно-геологических условий на рудных объектах, включая схемы инженерно-геологического районирования. В 2021 г. закончено составление предварительных схем районирования по всем рудным полям Российского разведочного района.

Начиная с 2014 г., проводятся систематические исследования фоновых экологических характеристик морской среды, в т. ч. изучение водной толщи, включающее гидрофизическое зондирование с отбором проб воды, измерение скорости и направления течений, биологические исследования, включая изучение объектов мега-, макро-, мейофауны, эпи- и инффауны, гидрометеорологические наблюдения. Биологические исследования проводились преимущественно силами специалистов Института Океанологии РАН.

Для сопровождения работ по изучению ТПИ океана в части систематизации данных и получения разносторонней оперативной информации по результатам исследований, а также выполнения обязательств по контракту в рамках регулярной отчетности о выполненных исследованиях, в ФГУП «ВНИИОкеангеология» в 2009 г. начата разработка реляционной базы данных в среде ACCESS. В 2017 г., в связи с

необходимостью интеграции и сопровождения всех контрактных работ с МОМД (ГПС, ЖМК и КМК), в базу данных стала вводиться информация по результатам работ в РРР–ЖМК и РРР–КМК в Тихом океане, содержащаяся в различных информационных источниках и локальных базах данных. С 2019 г. общая база данных модернизирована в соответствии с рекомендациями МОМД для корректного взаимодействия данными с Международным органом по морскому дну и преобразована в Информационно-аналитическую систему (ИАС) «Океангеоресурсы», включающую отдельные Банки данных (БД) по всем контрактным ТПИ.

В настоящее время «Банк данных РРР–ГПС» включает в себя наиболее полную информацию по всем проведенным исследованиям в пределах Российского разведочного района и на окружающих его площадях. В него входит информационная база данных (ИБД), справочники базы данных, система управления базой данных, библиотека запросов и прикладных программ. Цель БД – научно-информационное сопровождение разведочных работ в РРР–ГПС:

1. Данные по рейсам. Содержат информацию по 31 рейсу, включая дату проведения, судно, открытые рудные поля (рудопроявления).

2. Данные по рудным объектам. Включают в себя информацию по 21 рудному полю, содержат координаты, количество рудных тел, площадь рудных тел, наличие геотермальной активности, химический состав руд, их рудно-геохимическую специализацию, минералогию, текстурно-структурные особенности и вытекающие из этих характеристик прогнозно-ресурсные показатели по руде, основным и попутным металлам, редким элементам.

3. Данные по станциям геологического (1809) и гидрологического опробования (481). Включают номер рейса, координаты, глубину, методы отбора, рельеф дна, принадлежность к кластеру, блоку, рудному полю, наличие аномалии для гидрологической станции.

4. Данные по гидрологическим аномалиям. Содержат номер станции, глубину, наличие аномалий мутности, солености, растворенных и взвешенных металлов.

5. Данные по образцам (2380 образцов сульфидов, 1918 образцов пород, 4302 образцов осадков и 379 образцов корок), включающие тип, описание, классификацию и возраст образований.

6. Результаты химического анализа состава руд и других образований различными лабораторными аналитическими методами. Содержат данные анализов по 70 химическим элементам и 11 окислам, включая данные по лаборатории, используемым методам и пределам чувствительности аппаратуры.

7. Данные по минеральному составу (35 минералов и окислов).

8. Данные по гранулометрическому составу осадков.

9. Профильные исследования. Содержат координаты начала и конца профилей, глубину, протяженность, кластеры. Дополнительно для измерений напряженности естественного электрического поля – наличие зарегистрированных аномалий и для телепрофилирования – данные о зарегистрированной гидротермальной активности и фауне.

10. Аномалии напряженности естественного электрического поля: профиль, координаты аномалий и их амплитуды.

11. Данные по инженерно-геологическим исследованиям. Содержат физико-механические, прочностные и деформационные свойства, определяемые на борту судна и в лабораториях, для 2638 образцов руды и пород, 117 образцов осадков.

12. Данные по фоновым экологическим исследованиям.

В соответствии с «Правилами поиска и разведки полиметаллических сульфидов в Районе» и контрактными обязательствами в рамках выполнения контракта необходимо произвести поэтапный отказ от 75 % площади изначально заявленного района: к концу восьмого года с даты контракта следует отказаться не менее, чем от 50 %, и еще от 25 % – на 10-й год контракта. В 2020 г. закончена работа по выбору 50 % площади Разведочного российского района для отказа, а в 2022 г. выполнен выбор еще 25 %. Окончательный выбор площадей, остающихся в составе северной части Российского разведочного района для дальнейших работ, представлен на рисунке 4.

Процедура отказа была основана на анализе прямых и косвенных геолого-геофизических признаков возможного наличия гидротермальной деятельности и оруденения в пределах РРР–ГПС. В состав окончательной площади вошло 2 500 ячеек размером 1×1 км (Отчет о проведении..., 2022). Площадь, оставленная после процедуры отказа в составе РРР–ГПС для дальнейших работ, включает все выявленные к настоящему времени рудные объекты, а также районы перспективные на обнаружение новых гидротермальных рудных полей. Результаты отказов переданы и приняты МОМД в 2022 г.

В связи с переходом на оценочный этап геологоразведочных работ в 2022 г. во ФГБУ «ВНИИОкеангеология» начаты работы по составлению крупномасштабных карт структур рудных полей, для которых была разработана базовая типовая легенда. Карты структур рудных полей, сопровождающие материалы при изучении *открытых* рудных объектов, являются как интеграционной картографической базой изученности рудных полей, так и картами прогностической направленности для планирования поисков новых рудных объектов. Выполненные работы по составлению крупномасштабных карт структур рудных полей являются основой для создания базового комплекта карт рудных объектов РРР–ГПС, в том числе в формате ГИС.

В процессе работы собрана и систематизирована информация по геолого-геофизической изученности гидротермальных рудных полей Ириновское-1, (входит в состав рудного узла Ириновский), Семенов-1, Семенов-2, Семенов-3, Семенов-4, Семенов-5, входящих в состав рудного узла Семенов. Пример карты структур рудных полей Семенов-3 и 5 приведен на рисунке 5.

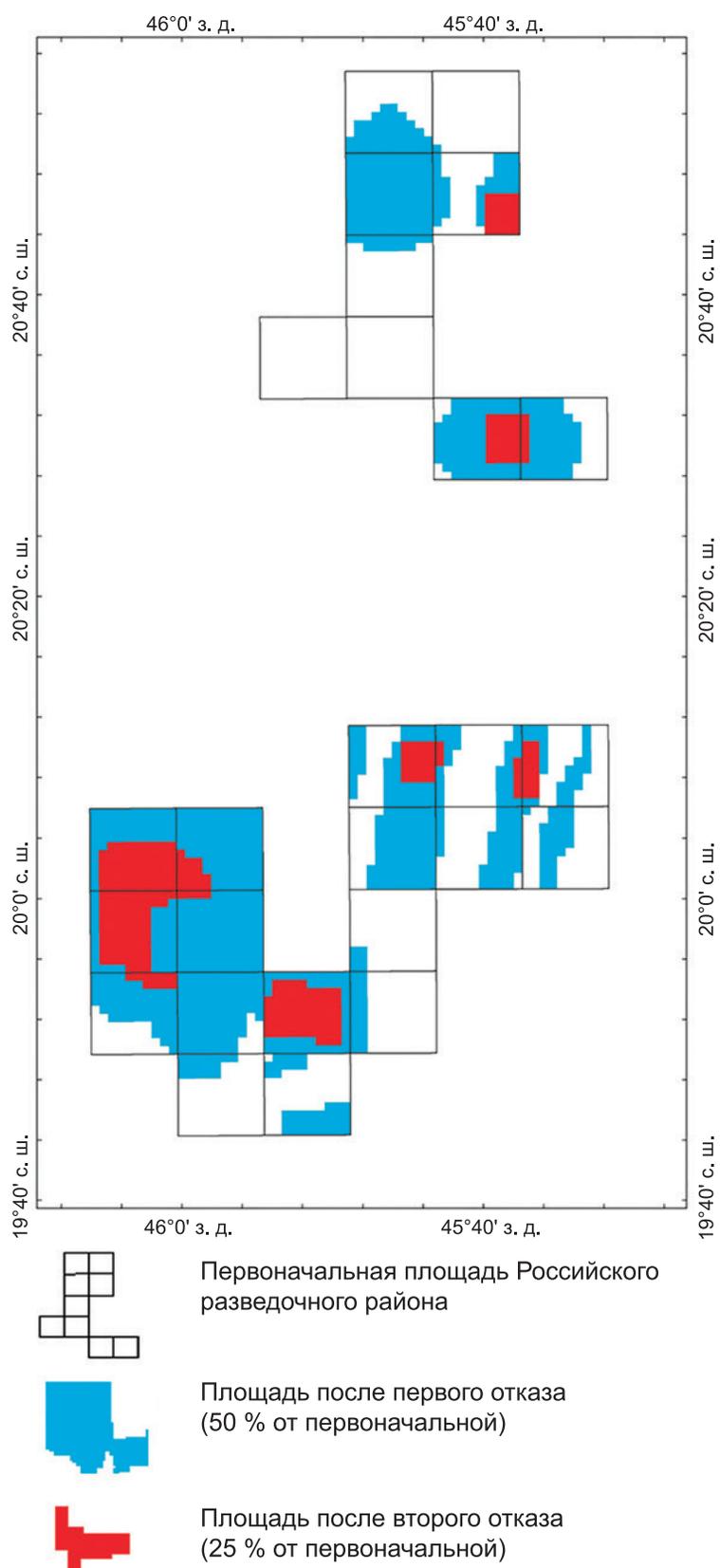


Рис. 4 – Северная часть РРР. Площади (красный цвет) остающиеся в составе РРР–ГПС

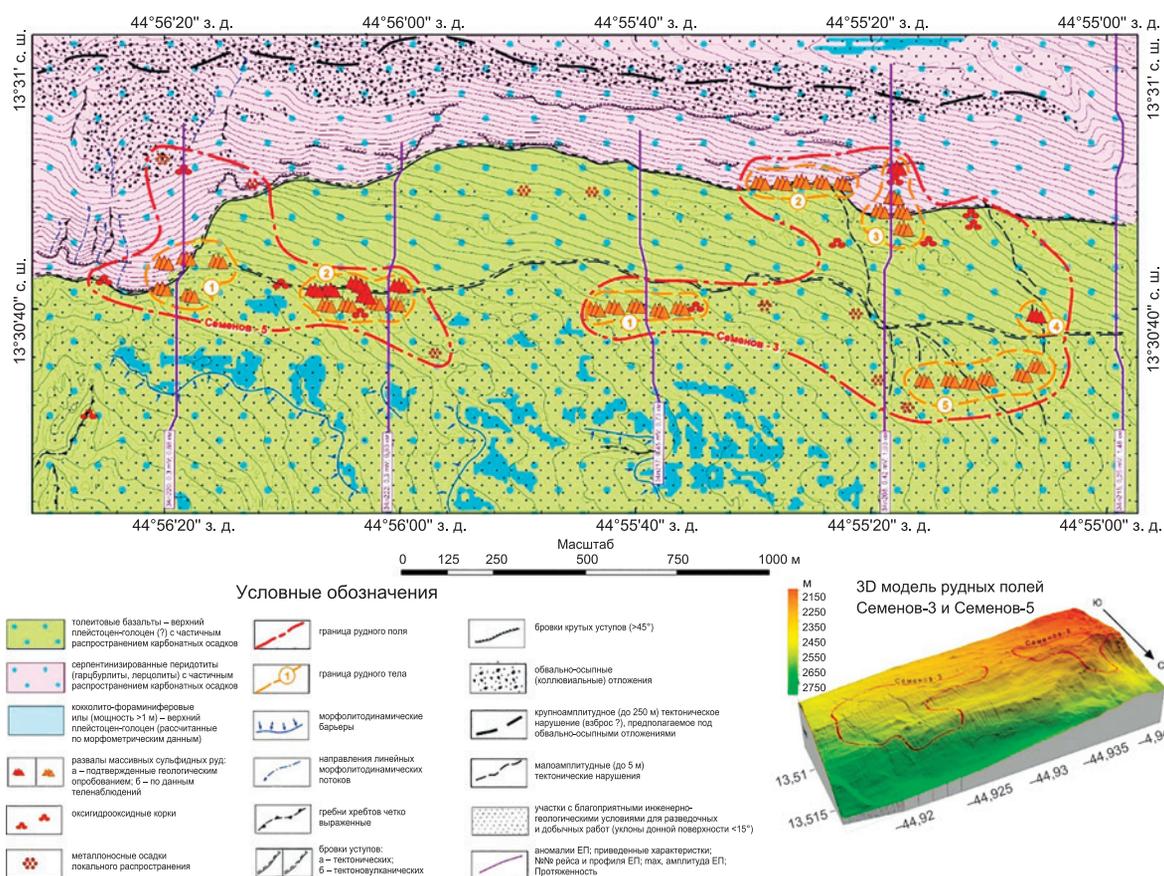


Рис. 5 – Предварительная карта структуры рудных полей Семенов-3 и Семенов-5

В настоящее время проводятся оценочные работы на открытых рудных полях. На данном этапе исследований помимо ранее применяемых методов планируется проведение дополнительных видов работ с новыми техническими средствами:

- высокоразрешающая батиметрическая съемка с придонным многолучевым эхолотом SeaBat 7125;
- отбор проб и видеосъемка телеуправляемым необитаемым подводным аппаратом Sperre Subfighter 30K;
- магниторазведка с глубоководным буксируемым магнитометром-градиентометром;
- бурение глубоководным комплексом ТК-15.

Главной задачей геологоразведочных работ в целом является оценка ресурсов и подсчет запасов сульфидных руд для подготовки Технико-экономического обоснования (ТЭО) и принятия решения о целесообразности будущей добычи. Помимо геологических данных в ТЭО входит экономическая, технологическая и экологическая информация, а также схемы переработки руд. Можно сказать, что при условии стабильного финансирования геологоразведочные работы оценочной и разведочной стадий будут успешно завершены и необходимая ресурсная информация для включения в ТЭО будет подготовлена.

## Заключение

Приведенные материалы научно-исследовательских (до заключения контракта) и геологоразведочных работ после заключения контракта на глубоководные полиметаллические сульфиды дают представление о ходе исследований в осевой зоне северной приэкваториальной зоны Срединно-Атлантического хребта. Основные результаты более чем за 35-летний срок работ сводятся к следующему:

1. На основании проведенных в доконтрактный период научно-исследовательских работ по изучению ГПС наиболее перспективным был выбран отрезок САХ от 12°48' до 20°54' с. ш.

2. После подготовки Заявки и ее одобрения Советом МОМД был подписан пятнадцатилетний контракт с Министерством природных ресурсов и экологии на выполнение разведочных работ на данном отрезке САХ (Российский разведочный район) в пределах 100 разведочных блоков общей площадью 10 000 км<sup>2</sup>.

3. На текущий момент в пределах РРР–ГПС завершены геологоразведочные работы поисковой стадии. Открыто 23 рудных поля и 6 рудопроявлений, часть из которых объединены в 5 рудных узлов. Начаты работы оценочной стадии.

4. В соответствии с правилами МОМД проведены работы по окончательному выбору 25 % площади Разведочного российского района (2 500 км<sup>2</sup>), остающейся в составе РРР–ГПС после первого и второго этапов отказа от части первоначальной площади. Все рудные объекты и перспективные участки вошли в состав выбранной площади.

5. Представленные материалы свидетельствуют о высокой эффективности выбранной методики проведения поискового этапа геологоразведочных работ.

6. Состав руд свидетельствует о высоких содержаниях полезных компонентов, превышающих их концентрации в колчеданных рудах, разрабатываемых на суше и являющихся древними аналогами современных океанских сульфидных руд.

7. Все результаты геологоразведочных работ, экологических и технологических исследований войдут в Технико-экономическое обоснование будущего освоения глубоководных полиметаллических сульфидов.

В заключение необходимо отметить большой научный вклад проведенных исследований в изучение геологии, процессов гидротермального рудообразования и экологии Срединно-Атлантического хребта. По материалам, полученным в рейсах НИС «Профессор Логачев», опубликовано более 100 научных статей в российских и иностранных журналах.

**Благодарности.** Работы на глубоководные полиметаллические сульфиды финансировались сначала Министерством геологии СССР, а затем Федеральным агентством по недропользованию Министерства природных ресурсов и экологии РФ.

Авторы выражают благодарность всем участникам экспедиционных работ ПМГРЭ, «ВНИИОкеангеология» и многих других организаций-партнеров, а также экипажам научно-исследовательских судов.

### Список литературы

1. *Бельтнев В. Е.* Региональные работы масштаба 1:500 000–1 000 000 на глубоководные полиметаллические сульфиды (ГПС) в осевой зоне САХ и поисковые работы на рудном узле Ашадзе-2 // Фонды АО «ПМГРЭ». Ломоносов. 2008. Кн. 1. 205 с.
2. *Бельтнев В. Е.* Геолого-геофизические исследования с целью выделения участков, перспективных на ГПС, в осевой зоне САХ (в пределах 11°–12°30' с. ш.) и поисковые работы на участке 13°31' с. ш. // Фонды АО «ПМГРЭ». Ломоносов. 2010. Кн. 1. 263 с.
3. *Дмитриев Л. В., Соболев А. В., Рейснер М. Г., Мелсон В. Д.* Петрохимические группы закалочных стекол ТОР (толеиты океанических рифтов) и их распределение в Атлантическом и Тихом океанах // Под ред. Ю. М. Пушаровского. В кн.: Магматизм и тектоника океана. М.: Наука, 1990. С. 43–108.
4. *Дмитриев Л. В.* Вариации составов базальтов Срединно-Океанических хребтов как функция геодинамической обстановки их формирования // Петрология. 1998. Т. 6. № 4. С. 340–362.
5. *Дмитриев Л. В., Соколов С. Ю., Мелсон В. Г., О'Хирн Т.* Плюмовая и спрединговая ассоциации базальтов и их отражение в петрологических и геофизических параметрах северной части Срединно-Атлантического хребта // Российский журнал наук о Земле. 1999. Т. 1. № 6. С. 457–476.
6. *Дмитриев Л. В., Силантьев С. А., Плечова А. А., Соколов С. Ю.* Сравнение базальтового магматизма в условиях разной скорости спрединга Срединно-Атлантического хребта (САХ) и Восточно-Тихоокеанского поднятия (ВТП) // Российский журнал наук о Земле. 2000. Т. 2. № 3. С. 2–20.
7. *Добрецова И. Г.* Поисковые работы на площади Российского разведочного района глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС) в Атлантическом океане в пределах блоков 47–60, 62–67, с выделением перспективных блоков // Фонды АО «ПМГРЭ», Ломоносов. 2019. Кн. 2. 303 с.
8. Контракт на разведку полиметаллических сульфидов между Международным органом по морскому дну и Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации. МОМД. Кингстон (Ямайка). 2012. 48 с.
9. Мировой океан. Том III: Твердые полезные ископаемые и газовые гидраты в океане. М.: Научный Мир, 2018. 708 с.
10. Отчет о проведении тематических и опытно-методических работ, связанных с геологическим изучением недр. Кн. 7, 8 // Фонды ФГУП «ВНИИОкеанология». Санкт-Петербург, 2022. Т. 7 – 234 с. Т. 8 – 196 с.
11. *Рождественская И. И.* Поисковые работы на площади Российского разведочного района в Атлантическом океане с оценкой прогнозных ресурсов ГПС категории P2 в блоках 1–12, 15–17 // Фонды АО «ПМГРЭ». Ломоносов, 2014.
12. *Firstova A., Stepanova T., Cherkashov G., Goncharov A., Babaeva S.* Composition and Formation of Gabbro-Hosted Seafloor Massive Sulfide Deposits from the Ashadze-1 Hydrothermal Field, Mid-Atlantic Ridge // Minerals. 2016. No. 6 (1). P. 19. <https://doi.org/10.3390/min6010019/>.
13. *Firstova A., Stepanova T., Sukhanova A., Cherkashov G., Poroshina I.* Au and Te Minerals in Seafloor Massive Sulphides from Semyenov-2 Hydrothermal Field, Mid-Atlantic Ridge // Minerals. 2019. No. 9 (5). P. 294. <https://doi.org/10.3390/min9050294/>.
14. *Fouquet Y., Cherkachev G., Charlou J. L. et al.* Serpentine cruise – ultramafic hosted hydrothermal deposits on the Mid-Atlantic Ridge: First submersible studies on Ashadze 1 and 2, Logatchev 2 and Krasnov vent fields // InterRidge News. 2008. Vol. 17. P. 15–19.

15. *Jameieson J. W., Petersen S., Augustin, Steinfuhrer A., and Escartin J.* Sea-floor massive sulfide formation on oceanic core complex: recent exploration of the Semyenov and Irinovskoe hydrothermal fields, Mid- Atlantic Ridge // *Minerals of the Ocean-7/ Abstract volume/ St/ Petersburg, 2014. P. 42–45.*
16. *Gente P., Ceuleneer G., Dauteuil O. et al.* 4-D Architecture of the Oceanic Lithosphere // *InterRidge News. 1996. Vol. 5. No. 2.*
17. *MacLeod C. J., Searle R. C., Murton B. J., Casey J. F., Mallows C., Unsworth S. C., Achenbach K. L., Harris M.* Life cycle of oceanic core complexes // *Earth Planet. Sci. Letters. 2009. Vol. 287. P. 333–344.*

Статья поступила в редакцию 23.10.2023, одобрена к печати 06.12.2023.

**Для цитирования:** Черкашѳв Г. А., Бельтенѳв В. Е., Егоров И. В., Ермакова Л. А., Колчина Н. Л., Кондратенко А. В., Фирстова А. В., Сотникова А. С. Геологоразведочные работы на глубоководные полиметаллические сульфиды в осевой зоне Срединно-Атлантического хребта: результаты исследований в Российском разведочном районе // *Океанологические исследования. 2023. № 51 (4). С. 167–185. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(4\).7](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(4).7).*

## **GEOLOGICAL EXPLORATION FOR DEEP-SEA POLYMETALLIC SULPHIDES AT THE AXIAL ZONE OF THE MID-ATLANTIC RIDGE: RESEARCH RESULTS AT THE RUSSIAN EXPLORATION AREA**

**G. A. Cherkashev<sup>1,2</sup>, V. E. Beltenev<sup>1</sup>, I. V. Egorov<sup>1</sup>, L. A. Ermakova<sup>1</sup>, N. L. Kolchina<sup>1</sup>,  
A. V. Kondratenko<sup>1</sup>, A. V. Firstova<sup>1</sup>, A. S. Sotnikova<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Academician I.S. Gramberg All-Russian Scientific Research Institute for Geology  
and Mineral Resources of the Ocean (VNIIOkeangeologia),  
1, English prospekt, St. Petersburg, 190121, Russia,  
e-mail: v.belt@yandex.ru;*

<sup>2</sup>*St. Petersburg State University – Institute of Earth Sciences,  
7–9, Universitetskaya naberezhnaya, St. Petersburg, 199134, Russia,  
e-mail: gcherkashov@gmail.com*

An overview of Russian studies of deep-sea polymetallic sulfides (PMS) in the axial zone of the Mid-Atlantic Ridge (MAR) at the Russian Exploration Area (REA–PMS) is presented. A brief geological description of the axial zone of the MAR and PMS sites discovered and studied for almost forty years before and after the signing of an exploration contract with the International Seabed Authority in 2012 is given. Information on methods for conducting searches and exploration of PMS, technical equipment, as well as on metallurgical processing of raw materials is presented.

**Keywords:** deep-sea polymetallic sulphides, Mid-Atlantic Ridge, Russian Exploration Area, axial zone, International Seabed Authority

**Acknowledgments:** Work on deep-sea polymetallic sulfides was financed first by the Ministry of Geology of the USSR, and then by the Federal Agency for Subsoil Use of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation.

The authors express their gratitude to all participants in the expeditionary work of PMGRE, “VNIIOkeangeologiya” and many other partner organizations, as well as the crews of research vessels.

## References

1. Beltenev, V. E., 2008: Regional works on a scale of 1:500 000–1 000 000 for deep-sea poly-metallic sulfides (PMS) at the axial zone of the MAR and search works at the Ashadze cluster. *JSC “PMGE”*, Lomonosov, 1, 205 p.
2. Beltenev, V. E., 2010: Geological and geophysical study in order to identify perspective sites for PMS at the axial zone of the MAR (within 11°–12 °30 W.) and search work at the site 13°31 W. *JSC “PMGRE”*, Lomonosov, 1, 263 p.
3. *Contract for exploration of the polymetallic sulphides between the International Seabed Authority and the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation*. 2012, ISA Kingston (Jamaica), 48 p.
4. Dmitriev, L. V., A. V. Sobolev, M. G. Reisner, and V. D. Melson, 1990: Petrochemical groups of tempered glasses of the TOR (tholeites of oceanic rifts) and their distribution in the Atlantic and Pacific oceans, Ed. Yu. M. Pushcharovsky, In: *Magmatism and ocean tectonics*. Moscow, Nauka, 43–108.
5. Dmitriev, L. V., 1998: Variations of basalt compositions of the Mid-Oceanic ridges as a function of geodynamic environment of their formation. *Petrology*, 6 (4), 340–362.
6. Dmitriev, L. V., S. Yu. Sokolov, V. G. Melson, and T. O’Hearn, 1999: Plume and spreading associations of basalts and their reflection in petrological and geophysical parameters of the northern part of the Mid-Atlantic ridge. *Russian Journal of Earth Sciences*, 1 (6), 457–476.
7. Dmitriev, L. V., S. A. Silantsev, A. A. Plechova, and S. Yu. Sokolov, 2000: Comparison of basalt magmatism under conditions of different spreading rates of the Mid-Atlantic Ridge (MAR) and the East Pacific rise (EPR). *Russian Journal of Earth Sciences*, 2 (3), 2–20.
8. Dobretsova, I. G., 2019: Search works at the Russian exploration area of deep-sea polymetallic sulphides (PMS) in the Atlantic Ocean within blocks 47–60, 62–67, with the allocation of the perspective blocks. *JSC “PMGE”*, Lomonosov, 2, 303 p.
9. Firstova, A., T. Stepanova, G. Cherkashov, A. Goncharov, and S. Babaeva, 2016: Composition and Formation of Gabbro-Hosted Seafloor Massive Sulfide Deposits from the Ashadze-1 Hydrothermal Field, Mid-Atlantic Ridge. *Minerals*, 6 (1), 19, <https://doi.org/10.3390/min6010019>.
10. Firstova A., T. Stepanova, A. Sukhanova, G. Cherkashov, and I. Poroshina, 2019: Au and Te Minerals in Seafloor Massive Sulphides from Semyenov-2 Hydrothermal Field, Mid-Atlantic Ridge. *Minerals*, 9 (5), 294, <https://doi.org/10.3390/min9050294>.
11. Fouquet, Y., G. Cherkachev, and J. L. Charlou et al., 2008: Serpentine cruise – ultramafic hosted hydrothermal deposits on the Mid-Atlantic Ridge: First submersible studies on Ashadze 1 and 2, Logatchev 2 and Krasnov vent fields. *InterRidge News*, 17, 15–19.
12. Gente, P., G. Ceuleneer, and O. Dauteuil et al., 1996: On- and Off-axis Submersible Investigations on an Highly Magmatic Sediment of the Mid-Atlantic Ridge (21°40' N): the TAMMAR Cruise. *InterRidge News*, 5 (2), 27–31.
13. Jameison, J. W., S. Petersen, Augustin, A. Steinfuhrer, and J. Escartin, 2014: *Sea-floor massive sulfide formation on oceanic core complex: recent exploration of the Semyenov and Irinovskoe hydrothermal fields, Mid- Atlantic Ridge Minerals of the Ocean-7*. Abstract volume, Saint Petersburg, 42–45.

14. MacLeod, C. J., R. C. Searle, B. J. Murton, J. F. Casey, C. Mallows, S. C. Unsworth, K. L. Achenbach, and M. Harris, 2009: Life cycle of oceanic core complexes. *Earth Planet. Sci. Letters*, **287**, 333–344.
15. Report on the conduct of thematic and experimental and methodological works related to the geological study of the bowels Vol. 7, 8, 2022: *FSBI "VNIIOkeangeologiya"*, Saint Petersburg, Vol. 7 – 234 p.; Vol. 8 – 196 p.
16. Rozhdestvenskaya, I. I., 2014: Search works at the Russian exploration area at the Atlantic Ocean with an assessment of the forecast resources of PMS of category P2 in the blocks 1–12, 15–17. *JSC "PMGE"*, Lomonosov, **1**, 222 p.
17. The World ocean. 2018. Volume III: *Solid minerals and gas hydrates in the ocean*. Ed. G. A. Cherkashova, Moscow, Scientific World, 708 p.

Submitted 23.10.2023, accepted 06.12.2023.

**For citation:** Cherkashev, G. A., V. E. Beltenev, I. V. Egorov, L. A. Ermakova, N. L. Kolchina, A. V. Kondratenko, A. V. Firstova, and A. S. Sotnikova, 2023: Geological exploration for deep-sea polymetallic sulphides at the in the axial zone of the Mid-Atlantic Ridge: research results at the Russian Exploration Area. *Journal of Oceanological Research*, **51** (4), 167–185, [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51\(4\).7](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2023.51(4).7).