

На правах рукописи

Петров Владимир Антонович



**ГИДРОГЕОХИМИЯ МЕТАНА И РУДООБРАЗУЮЩИХ
МЕТАЛЛОВ В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ОРЕОЛАХ
РАССЕЯНИЯ (НА ПРИМЕРЕ РУДНЫХ ПОЛЕЙ
РОССИЙСКОГО РАЗВЕДОЧНОГО РАЙОНА
СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА)**

*Специальность 1.6.4. Минералогия, кристаллография.
Геохимия, геохимические методы поисков полезных
ископаемых*

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

Санкт-Петербург – 2023

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

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук, профессор

Судариков Сергей Михайлович

Официальные оппоненты:

Силантьев Сергей Александрович

доктор геолого-минералогических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук, лаборатория геохимии магматических и метаморфических пород, заведующий лабораторией;

Мелекесцева Ирина Юрьевна

кандидат геолого-минералогических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии Уральского отделения Российской академии наук, обособленное подразделение – Институт минералогии, руководитель.

Ведущая организация – Акционерное общество "Полярная морская геологоразведочная экспедиция", г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **29 сентября 2023 г. в 14:00** на заседании диссертационного совета ГУ.3 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 28 июля 2023 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ГУЛЬБИН
Юрий Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Современная гидротермальная активность в пределах срединно-океанических хребтов (СОХ) способствует формированию рудных полей глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС). Исследования данных объектов обладают не только научной значимостью, но и практическим значением. По разным оценкам, значительное количество рудных полей остается неоткрытым вследствие слабой изученности СОХ и недостатков в методиках прогнозирования и поисков (Beaulieu et al., 2015; Baker et al., 2016; Tao et al., 2017).

Гидротермальные ореолы рассеяния (плюмы, «дымы» черных курильщиков), характеризующиеся высокими концентрациями ряда металлов (Cu, Zn, Mn, Fe и др.) и газов (CH₄, H₂ и др.), являются главными индикаторами гидротермальной активности. Знания о характере развития ореола рассеяния, его структуре и изменении его химического состава позволят с большой точностью определять положение гидротермального источника.

Диссертационное исследование направлено на изучение распределения метана и рудообразующих металлов (Cu, Zn, Mn, Fe) в гидротермальных ореолах рассеяния в пределах рудных полей Российского разведочного района Срединно-Атлантического хребта (САХ).

Степень разработанности темы исследования

Значительная часть предыдущих исследований сосредоточена на изучении мегаплюмов, сформировавшихся в результате интенсификации гидротермальной разгрузки при активной вулканической деятельности (Mottl et al., 1995; Gharib et al., 2005; Ray et al., 2008). Наиболее полно гидротермальные ореолы рассеяния изучены: в непосредственной близости (первые метры) от источника – зоне интенсивного смешения гидротермального раствора и морской воды (Ji et al., 2017;

Diehl, Bach, 2020; Koschinsky et al., 2020); в глобальном масштабе (десятки-сотни километров от источника) – как фактор влияния на химический состав вод Мирового океана (Boulart et al., 2017; Lee et al., 2018; Lee et al., 2021). Важным вопросом остается изучение химического состава гидротермальных ореолов рассеяния в масштабе гидротермального поля – десятки-сотни метров от источника (Coogan et al., 2017; Fang, Wang, 2021; Surya Prakash et al., 2022).

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности по пунктам 13, 17, 18 и 21.

Объект исследования – гидротермальные ореолы рассеяния, формирующиеся в пределах рудных полей глубоководных полиметаллических сульфидов срединно-океанических хребтов.

Предмет исследования – процесс формирования и изменения химического состава и пространственной структуры гидротермальных ореолов рассеяния.

Цель работы – выявление гидрогеохимических закономерностей распределения металлов (Cu, Zn, Fe, Mn) и метана в гидротермальных ореолах рассеяния (на примере рудных полей Ашадзе-2, Логачев-1, Коралловое, Молодежное и Пюи-де-Фоль), а также совершенствование методики прогнозирования положения гидротермальных источников.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Обобщение и статистический анализ накопленных данных о составе гидротермальных растворов и ореолов рассеяния в пределах гидротермальных полей срединно-океанических хребтов.

2. Изучение закономерностей распределения метана и металлов в гидротермальных ореолах рассеяния.

3. Изучение структуры и характера развития ореола рассеяния, формирующегося в пределах рудного поля Ашадзе-2.

4. Оценка возможности применения предложенной методики для прогнозирования положения гидротермальных источников.

Научная новизна работы:

1. Установлены интервал распространения метана в придонной водной толще и закономерности распределения метана в гидротермальных ореолах рассеяния.

2. Выявлены закономерности распределения металлов (Cu, Zn, Fe, Mn) в пределах рудного поля Ашадзе-2. Показано, что миграция этих элементов происходит на нескольких горизонтах вокруг гидротермального источника во взвешенной и растворенной форме.

3. Обосновано формирование вихревой структуры ореола рассеяния вокруг активного гидротермального источника Ашадзе-2 и выявлены факторы, оказывающие влияние на ее формирование.

Теоретическая и практическая значимость работы:

На основании данных о распределении рудообразующих металлов (Cu, Zn, Fe, Mn) вокруг гидротермального источника Ашадзе-2 построена модель формирования вихревой структуры ореола рассеяния. Доказана надежность повышенного содержания метана, как признака гидротермальной активности, в пределах блоков ультраосновных пород Срединно-Атлантического хребта. Предложена методика прогнозирования положения гидротермальных источников на основе соотношений растворенных и взвешенных форм Zn, Cu, Fe и Mn, определяемых по результатам опробования водной толщи с учетом формирования вихревой структуры гидротермального ореола.

Результаты и научные выводы диссертации могут быть использованы при поисковых и геоэкологических исследованиях в рамках контрактных работ в пределах РРР-САХ в морских экспедициях, проводящихся АО «ПМГРЭ» и ФГБУ

«ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга» (получен акт внедрения от 01.06.2023), а также в учебных курсах «Прикладная гидрогеохимия» и «Специальная гидрогеохимия».

Методология и методы исследования. Методологической основой исследования является научный подход с комплексированием современных геохимических и океанологических методов. В диссертации были использованы результаты вертикального зондирования и опробования водной толщи зондом CTD SBE 911plus, с отбором проб воды кассетным пробоотборником SBE 32 Carousel оснащенный 12 пятилитровыми батометрами. Результаты получены сотрудниками Полярной морской геологоразведочной экспедиции и ВНИИОкеангеология в ходе 20, 22, 24, 26, 30, 39, 41, 42 и 45 рейсов научно-исследовательского судна (НИС) «Профессор Логачев» в пределах САХ. Для отделения взвешенных форм металлов пробы фильтровались под вакуумом через полиядерные фильтры с диаметром пор 0.45 мкм. Анализ гидрохимических проб проводился методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии во ВНИИОкеангеология. Составленная выборка состоит из 350 станций вертикального зондирования и 1842 пробы воды, отобранных из океанической толщи в пределах долины САХ. Для измерения концентраций метана был использован датчик растворенного метана Franatech METS methane sensor. Всего было проведено 12 измерений концентраций метана: 6 в районе полей Коралловое и Молодежное, 5 в пределах поля Пюи-де-Фоль и 1 в пределах поля Логачев-1. Полученные данные систематизированы и интерпретированы с использованием программ Surfer, Grapher, CorelDraw, Excel.

На защиту выносятся следующие положения:

1. В пределах Российского разведочного района Срединно-Атлантического хребта ореолы рассеяния метана локализованы в придонной части водной толщи (200 м от океанического дна), при этом, ореолы, пространственно

ассоциированные с перидотитами, характеризуются более высокими концентрациями метана по сравнению с ореолами, приуроченными к базальтам.

2. Вокруг гидротермального источника Ашадзе-2 формируется вихревая структура ореола рассеяния, в котором миграция рудообразующих металлов в интервале 200–700 метров от источника происходит с разным соотношением растворенных и взвешенных форм: Cu и Zn распространяются преимущественно в растворенной форме, а Fe и Mn – во взвешенной, при этом, доля растворенных форм Cu, Zn и Fe постепенно снижается, а доля взвешенных форм этих элементов повышается с удалением от источника.

3. Поиск очагов гидротермальной разгрузки с учетом гидродинамических характеристик ореола рассеяния целесообразно осуществлять, используя в качестве признака гидротермальной активности аномальные соотношения растворенных и взвешенных форм металлов (Cu, Zn, Mn, Fe), а в качестве метода – адаптированный принцип мультилатерации.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена точностью позиционирования в процессе опробования, представительностью проб воды, корректной статистической обработкой результатов измерений, регулярной проверкой измерительной аппаратуры и использованием аналитических данных, полученных в аккредитованных лабораториях ВНИИОкеангеология.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на семинарах, конкурсах и конференциях. В их числе: XXIII Международная Научная Конференция (Школа) по морской геологии (Москва, 2019), XIII Международная научно-практическая конференция «Геология в развивающемся мире» (Пермь, 2020), Конкурс научных работ студентов и аспирантов Санкт-Петербурга в области океанологии (Санкт-Петербург, 2021), Geological

International Student Summit 2022 (Санкт-Петербург, 2022), XXIV Международная Научная Конференция (Школа) по морской геологии (Москва, 2022), XVIII Большой географический фестиваль (Санкт-Петербург, 2022), X Международная научная конференция «Молодые – наукам о Земле» (Москва, 2022), Международный молодежный научный форум «Ломоносов-2022» (Москва, 2022), Научная конференция «Полезные ископаемые России и их освоение» (Санкт-Петербург, 2022), XV Международная научно-практическая конференция «Геология в развивающемся мире» (Пермь, 2022), XIV Большой географический фестиваль (Санкт-Петербург, 2023); X Международная конференция «Полезные ископаемые Мирового океана» (Санкт-Петербург, 2023).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и формулировке задач диссертационного исследования, анализе научной литературы по проблематике исследования, участии в камеральных работах, обработке аналитических данных, интерпретации и обобщении результатов, и формулировке выводов.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 12 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее - Перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 6 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 288 наименований. Диссертация изложена на 157 страницах, содержит 72 рисунка и 10 таблиц.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность своему научному руководителю д.г.-м.н., профессору Сударикову С.М., а также коллективам кафедры гидрогеологии и инженерной геологии и кафедры минералогии, кристаллографии и петрографии за всестороннюю поддержку. Автор считает своим долгом выразить благодарность Бельтенеу В.Е., Черкашеву Г.А. (ФГБУ «ВНИИОкеангеология»), Наркевскому Е.В., Добрецовоу И.Г., Антиповой И.В. (АО «ПМГРЭ») за проведение аналитических работ, предоставленные ценные материалы и обсуждение результатов. Автор благодарит Питаль С.В., Исакова В.А. (ФГБУ «Гидроспецгеология») за помощь при проведении исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрена проблема формирования гидротермальных растворов и ореолов рассеяния в пределах гидротермальных полей срединно-океанических хребтов.

Во второй главе представлена общая информация о геологическом строении объектов исследования (поля Ашадзе-2, Коралловое, Молодежное, Логачев-1, Пюи-де-Фоль).

В третьей главе описана методика полевых работ и приведены аналитические методы, использованные в работе.

В четвертой главе приведена характеристика аномалий метана в пределах полей Коралловое, Молодежное, Логачев-1, Пюи-де-Фоль, а также выполнен статистический анализ данных о содержании метана в гидротермальных растворах и ореолах рассеяния.

В пятой главе показаны закономерности распределения рудообразующих металлов (Cu, Zn, Fe, Mn) в водной толще в пределах поля Ашадзе-2 и охарактеризованы изменения со-

держаний этих элементов в ореоле рассеяния в ходе его распространения от источника.

В шестой главе выполнен статистический анализ соотношений растворенных и взвешенных форм металлов в ореоле рассеяния поля Ашадзе-2, а также продемонстрирована возможность практического использования адаптированного метода мультилатерации при выделении перспективных площадей гидротермальной активности.

Заключение отражает обобщенные выводы по результатам исследования в соответствии с целью и решаемыми задачами.

Краткая характеристика объектов исследования

Исследованные объекты расположены в пределах Российского разведочного района Срединно-Атлантического хребта между 12°48' и 20°54' с.ш. (рисунок 1а). В пределах выделенного интервала в бортах долины широко распространены внутренние океанические комплексы, сложенные, преимущественно, габброидами и апоперидотитовыми серпентинитами. К ним приурочены гидротермальные узлы Логачев и Ашадзе, поля Коралловое и Молодежное. Магматическая активность в пределах днища долины способствует формированию неовулканических поднятий, сложенных базальтами. К одному из таких поднятий приурочено поле Пюи-де-Фоль.

Гидротермальный узел Ашадзе расположен в западном борту долины САХ (12°58' с.ш.) и включает 4 рудных объекта (2 рудных поля и 2 рудопроявления). В данной работе интерес представляют поля Ашадзе-1 и Ашадзе-2 на глубине ~4100 и ~3300 метров. Ашадзе-1 характеризуется несколькими близко расположенными зонами гидротермальной разгрузки в западной части рудного поля. Ашадзе-2 отличается сосредоточенной импульсивной гидротермальной разгрузкой, способствующей формированию гидротермального кратера.

Гидротермальные поля Коралловое и Молодежное расположены в западном борту долины САХ (13°07' и 13°09' с.ш.) на глубине ~2825 и ~3525 метров в ~5 км друг от друга. Гидротермальная разгрузка в пределах поля Коралловое сосредоточена в северной его части. В пределах поля Молодежное трубы курильщиков рассредоточены по всей территории объекта.

Гидротермальное поле Логачев-1 расположено в пределах тектонической ступени восточного борта долины САХ (14°45' с.ш.). Массив, к которому приурочено поле, сложен преимущественно габбро-перидотитами, базальты отмечены только вблизи днища долины. Гидротермальная разгрузка рассредоточена – в пределах поля существует несколько источников в виде трубных комплексов и кратеров.

Гидротермальное поле Пюи-де-Фоль приурочено к вершинной поверхности аномально крупного вулкана центрального типа, расположенного в области пересечения рифтовой долины и нетрансформного разлома на глубине ~1800 метров (20°30' с.ш.). Магматические породы представлены базальтами. Гидротермальная разгрузка в пределах поля рассредоточена по всей площади объекта.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. В пределах Российского разведочного района Срединно-Атлантического хребта ореолы рассеяния метана локализованы в придонной части водной толщи (200 м от океанического дна), при этом, ореолы, пространственно ассоциированные с перидотитами, характеризуются более высокими концентрациями метана по сравнению с ореолами, приуроченными к базальтам.

Измерение концентраций метана в водной толще в пределах гидротермальных полей Коралловое, Молодежное, Логачев-1 и Пюи-де-Фоль показало, что его содержания в при-

донном слое превышают фоновые значения (~2 нмоль/л). Распространение ореолов рассеяния метана происходит на высоте до 200 метров от океанического дна (рисунок 2). Наиболее высокие концентрации метана (до ~19 нмоль/л) наблюдались в пределах полей Коралловое и Логачев-1 (~50 метров от источников). При удалении от источника более чем на 200 метров концентрации метана быстро снижались до ~3-5 нмоль/л. В пределах гидротермального поля Пюи-де-Фоль концентрации метана в ореоле рассеяния не превышали ~3-4 нмоль/л в непосредственной близости от источника (~50 метров). При этом, максимальные концентрации во всех случаях сосредоточены на высоте до 100 метров от дна. Смешение гидротермального раствора с морской водой способствует стремительному окислению метана в пределах первых десятков метров от источника. Таким образом, концентрации метана выше ~3-4 нмоль/л в придонной толще указывают на близость источника (до ~250 метров от точки измерения).

Для характеристики гидротермального раствора и определения закономерностей распределения метана в гидротермальных ореолах рассеяния в зависимости от особенностей геологического строения рудных полей был проведен сравнительный анализ данных о концентрациях метана и соотношения CH_4/Mn , полученных в ходе рейсов НИС «Профессор Логачев», а также из открытой базы данных MARHYS и других опубликованных работ (Diehl, Vach, 2020). Гидротермальные растворы полей, приуроченных к перидотитам, характеризуются в среднем более высокими значениями концентраций метана и соотношения CH_4/Mn (2028 мкмоль/л, 148), по сравнению с растворами, циркулирующими в полях, ассоциирующими с базальтами (1336 мкмоль/л, 17) (рисунок 1в).

В результате смешения гидротермальных растворов с морской водой в ореолах рассеяния концентрации метана быстро снижаются, что способствует стремительному умень-

шению соотношения CH_4/Mn (рисунок 1г). Тем не менее, в ореолах рассеяния от источников, приуроченных к перидотитам, сохраняются более высокие значения этого соотношения, чем в ореолах от источников, связанных с базальтами (в среднем, 2.8 и 0.98, соответственно). Полученные соотношения указывают на относительно стабильное поступление обогащенных метаном растворов в пределах полей, связанных с перидотитами.

Вопрос об источнике метана в изучаемых гидротермальных полях является предметом дискуссии. Согласно одной из гипотез, объясняющих повышенные содержания метана в гидротермальных растворах, его образование связано с процессом серпентинизации ультраосновных пород (Klein et al., 2019). В результате реакции морской воды с двухвалентным железом Fe(II) , входящим в состав породообразующих силикатов (оливина, пироксенов), происходит окисление Fe(II) до трехвалентного железа Fe(III) , в то время как гидрон восстанавливается до H_2 (McCollom, Bach, 2008). В результате реакции H_2 с CO_2 происходит образование CH_4 . Данный механизм образования метана является частным случаем реакции Фишера-Тропша, называемым процессом Сабатье (Holm et al., 2015).

Регрессионный анализ имеющихся данных о химическом составе гидротермальных растворов показал отрицательную связь между CH_4 и Mg ($r = -0.88$) (рисунок 1б), а также тесную положительную связь компонентов $\text{CH}_4\text{-Fe}$ ($r=0.95$) и $\text{CH}_4\text{-Mn}$ ($r=0.98$) в растворах высокотемпературных источников, приуроченных к перидотитам. Полученные зависимости позволяют сделать предположение о генезисе метана непосредственно в гидротермальной системе и его дальнейшем переносе гидротермальным раствором совместно с рудными компонентами.

2. Вокруг гидротермального источника Ашадзе-2 формируется вихревая структура ореола рассеяния, в котором миграция рудообразующих металлов в интервале 200–700 метров от источника происходит с разным соотношением растворенных и взвешенных форм: Cu и Zn распространяются преимущественно в растворенной форме, а Fe и Mn – во взвешенной, при этом, доля растворенных форм Cu, Zn и Fe постепенно снижается, а доля взвешенных форм этих элементов повышается с удалением от источника.

Исходя из новых сведений о точном местоположении гидротермального источника Ашадзе-2 были интерпретированы данные о концентрациях растворенных и взвешенных форм металлов в водной толще в пределах рудного поля.

По результатам статистического анализа были выделены пробы с аномальными концентрациями растворенных и взвешенных форм Cu, Zn, Mn, Fe. Гидрогеохимические аномалии сосредоточены на нескольких горизонтах рассеяния вокруг единого гидротермального источника.

Наличие нескольких гидрогеохимических аномалий вокруг гидротермального источника Ашадзе-2 не соответствует принятой в начале исследования модели распространения гидротермального плюма. Положение аномалий указывает на формирование вихревой структуры ореола рассеяния. Был выделен ряд факторов, влияние которых может способствовать образованию подобной структуры:

- 1) пространственно-временная изменчивость придонных течений;
- 2) подповерхностная фазовая дифференциация гидротермальных растворов;
- 3) неустойчивость гидротермального плюма и сила Кориолиса;
- 4) дискретный характер гидротермальной разгрузки.

Растворенные и взвешенные металлы обладают значительными различиями в распределении. Аномалии растворенных форм металлов сосредоточены вблизи источника, а взвешенных форм – вдали от него.

Ореолы рассеяния меди и цинка характеризуются тесной корреляционной связью ($r \approx 0.89-0.90$) и пространственно близки друг к другу, что указывает на их преимущественно совместное распространение (рисунок 3). Растворенное железо формирует единственную аномалию – в юго-восточной части области исследования, где ранее предполагалось расположение источника (рисунок 4а). Аномалии взвешенного железа обнаружены почти на всех периферийных станциях области исследования (рисунок 4б). Подобное расположение и крайне низкие соотношения $Fe(p)/Fe(v)$ (среднее – 0.2) указывают на преимущественную миграцию железа во взвешенной форме. Марганец формирует слабое, но относительно стабильное поле повышенных концентраций на высоте ~150–200 метров от дна, что позволяет сделать предположение об устойчивости Mn к окислению и возможность распространения на значительные расстояния от источника (рисунок 4в).

Проведенный корреляционный анализ показал, что процентные доли растворенных и взвешенных Fe, Cu и Zn обладают сильной отрицательной и положительной корреляционной связью с расстоянием от источника, соответственно. При этом, медь и цинк мигрируют преимущественно в растворенной форме, а железо и марганец во взвешенной на всем интервале исследования (~200–700 метров). Устойчивость марганца к окислению способствует отсутствию видимых закономерностей в изменении процентных долей его растворенных и взвешенных форм с расстоянием (рисунок 5).

Постепенное окисление, переход во взвешенное состояние и осаждение способствуют тому, что пробы с максимальными суммарными концентрациями Cu и Zn

($\Sigma Me = Me(p) + Me(v)$) локализованы вблизи источника. Сосредоточение проб с максимальными суммарными концентрациями железа вдали от источника может быть обусловлено окислением и сорбцией растворенного железа из окружающей воды при небольших скоростях коагуляции и осаждения взвешенных частиц.

3. Поиск очагов гидротермальной разгрузки с учетом гидродинамических характеристик ореола рассеяния целесообразно осуществлять, используя в качестве признака гидротермальной активности аномальные соотношения растворенных и взвешенных форм металлов (Cu, Zn, Mn, Fe), а в качестве метода – адаптированный принцип мультилатерации.

Формирование вихревой структуры обуславливает необходимость совершенствования методики прогнозирования гидротермальных полей.

Для определения положения гидротермального источника с учетом формирования вихревой структуры ореола рассеяния была предложена методика, основанная на адаптированном принципе мультилатерации. Данный принцип используется для определения положения источника сигнала по известным координатам точек (приемников сигнала) вокруг источника и расстояний от каждой из точек до источника.

Исходя из сосредоточения аномалий растворенных форм Cu, Zn, Fe и Mn вблизи источника Ашадзе-2, была выдвинута гипотеза о постепенном снижении соотношения растворенных и взвешенных металлов ($[Me(p)]/[Me(v)]$) при удалении от источника, что позволило бы использовать это соотношение в качестве «сигнала» (признака) гидротермальной активности.

Проведенный статистический анализ с использованием критерия «трех сигм» (превышения фоновых значений более чем на три стандартных отклонения) позволил выделить пробы с аномальными соотношениями металлов. Корреляционный

анализ показал наличие значимой связи между соотношениями растворенных и взвешенных форм Cu, Zn и Fe и расстоянием от источника ($r \approx 0.61-0.65$). Отсутствие корреляции между $Mn(p)/Mn(v)$ и расстоянием объясняется устойчивостью этого элемента к окислению и практически неизменностью его концентраций в ореоле рассеяния. При этом, аномальные значения соотношений всех металлов локализованы на расстоянии до ~400 метров от источника Ашадзе-2 (рисунок 6).

С учетом вышесказанного, гидротермальный источник был принят как источник «сигнала», а точки опробования – как приемники «сигнала». В качестве «сигнала» принято аномальное соотношение $[Me(p)]/[Me(v)]$, где $Me(p)$ и $Me(v)$ – растворенные и взвешенные формы металлов (Cu, Zn, Fe, Mn). С учетом определенного эмпирическим путем максимального расстояния распространения «сигнала» (~400 метров), источник должен располагаться в пределах окружности радиусом 400 метров вокруг точки опробования с аномальным соотношением. В таком случае, площадь пересечения наибольшего количества окружностей от нескольких точек опробования, где были зафиксированы аномальные соотношения, будет указывать на вероятное положение гидротермального источника.

В пределах рудного поля Ашадзе-2 были проведены построения на основе адаптированного метода мультилатерации для каждого из элементов (Cu, Zn, Fe, Mn) в отдельности (рисунок 7а-г). Реальное положение гидротермального источника попадает в площади, ограниченные в результате использования предложенной методики. Наибольшую точность определения положения источника показали построения на основе соотношений $Cu(p)/Cu(v)$ и $Fe(p)/Fe(v)$, а наименьшую – на основе $Mn(p)/Mn(v)$.

Проверка предложенной методики проводилась в пределах гидротермального поля Ашадзе-1, где на одну схему опробования были нанесены результаты построения для каж-

дого из металлов (Cu, Zn, Fe, Mn). Прогнозируемая площадь положения гидротермального источника показала совпадение прогнозируемой площади с реальной областью гидротермальной разгрузки для поля Ашадзе-1 (Рисунок 7д).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, в результате проведенного гидрогеохимического исследования придонной водной толщи в пределах рудных полей Российского разведочного района Срединно-Атлантического хребта, были установлены закономерности распределения метана, растворенных и взвешенных форм металлов (Cu, Zn, Fe, Mn) в гидротермальных ореолах рассеяния.

Распространение ореолов рассеяния метана протекает вблизи океанического дна. Гидротермальные ореолы рассеяния рудных полей, приуроченных к перидотитам, характеризуются более высокими концентрациями метана и соотношениями CH_4/Mn , по сравнению с ореолами полей, ассоциированных с базальтами. Это указывает на более активное поступление метана в гидротермальные растворы полей, связанных с перидотитами.

В пределах рудного поля Ашадзе-2 аномалии растворенных форм металлов (Cu, Zn, Fe, Mn) в водной толще сосредоточены вблизи источника, а взвешенных форм – на удалении от источника. Рассредоточение гидрогеохимических аномалий на нескольких горизонтах вокруг источника указывает на формирование вихревой структуры ореола рассеяния.

Установлена зависимость между изменением соотношения растворенных и взвешенных форм металлов ($[Me(p)]/[Me(v)]$, где Me – Cu, Zn, Fe) и расстоянием от источника. Для определения положения гидротермального источника с учетом формирования вихревой структуры ореола рассеяния предложена методика, основанная на адаптированном методе мультилатерации. Применение данной методики в пределах гидротермальных полей Ашадзе-1 и Ашадзе-2 пока-

зало совпадение положения прогнозируемой площади и реального положения источника.

В качестве перспективы дальнейших исследований формирования и распространения гидротермальных ореолов рассеяния запланировано увеличение количества изучаемых объектов, совершенствование и адаптация предложенной методики определения перспективных площадей гидротермальной разгрузки для средне- и мелкомасштабных исследований. Также предполагается изучение технологий и разработка программного обеспечения автоматической интерпретации результатов гидрогеохимического исследования водной толщи.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Петров, В.А. Особенности миграции меди в зоне разгрузки гидротермальных растворов (Срединно-Атлантический хребет, 13° с.ш.) / В.А. Петров, С.М. Судариков, Д.В. Каминский, Е.В. Наркевский // Астраханский вестник экологического образования. – 2022. – № 3 (69). – С. 4-12.

2. Судариков, С.М. Результаты исследования аномалии метана в придонных водах гидротермального поля Логачев, Срединно-Атлантический хребет / С.М. Судариков, В.А. Петров, Е.В. Наркевский // Астраханский вестник экологического образования. – 2022. – № 3 (69). – С. 13-21.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Sudarikov, S. Identification of Two New Hydrothermal Fields and Sulfide Deposits on the Mid-Atlantic Ridge as a Result of the Combined Use of Exploration Methods: Methane Detection, Water Column Chemistry, Ore Sample Analysis, and Camera Surveys / S. Sudarikov, E. Narkevsky, V. Petrov // Minerals. – 2021. – 11 (7). – 726.

4. Sudarikov, S. In-Situ Study Methods Used in the Discovery of Sites of Modern Hydrothermal Ore Formation on the Mid-Atlantic Ridge / S. Sudarikov, V. Petrov, E. Narkevsky, I. Dobretsova, I. Antipova // Minerals. – 2022. 12 (10). – 1219.

5. Sudarikov, S.M. On the possibility of reducing man-made burden on benthic biotic communities when mining solid minerals using technical means of various designs / S.M. Sudarikov, D.A. Yungmeister, R.I. Korolev, V.A. Petrov // Journal of Mining institute. – 2022. – V. 253 (1). – P. 82-96.

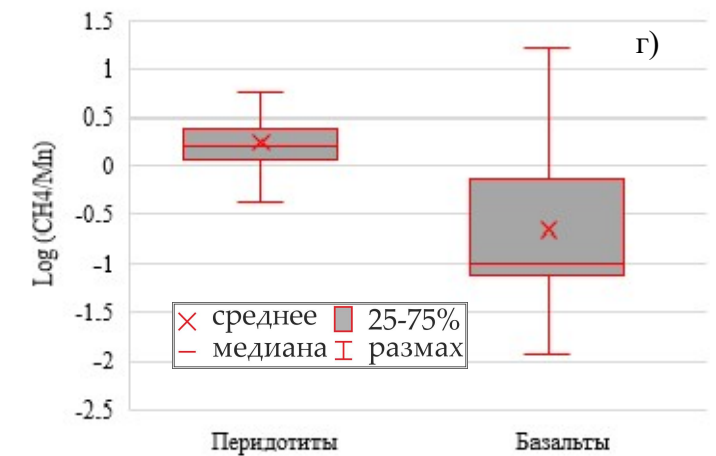
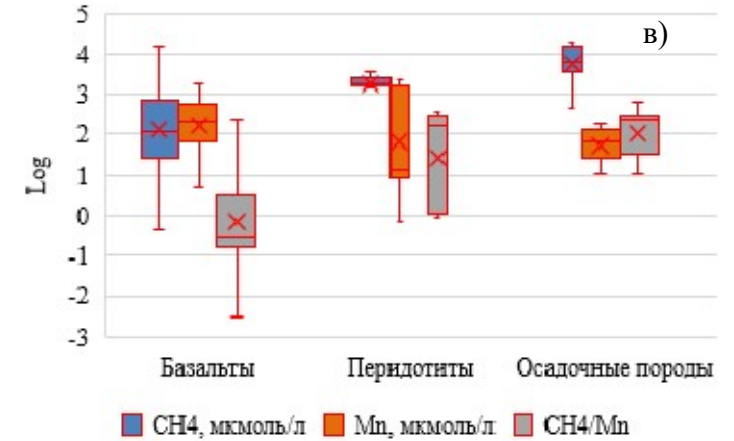
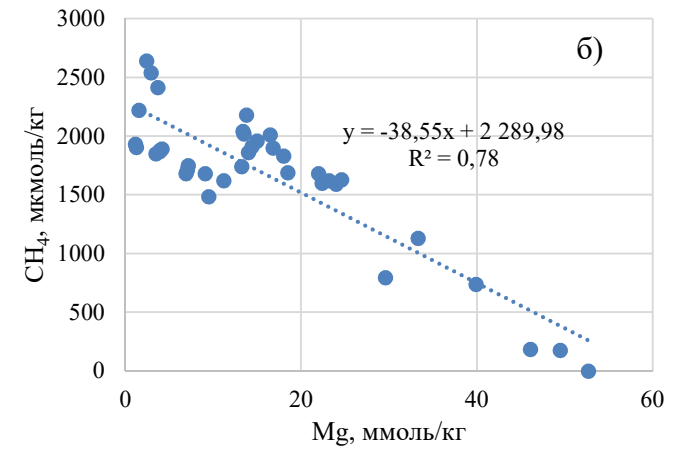
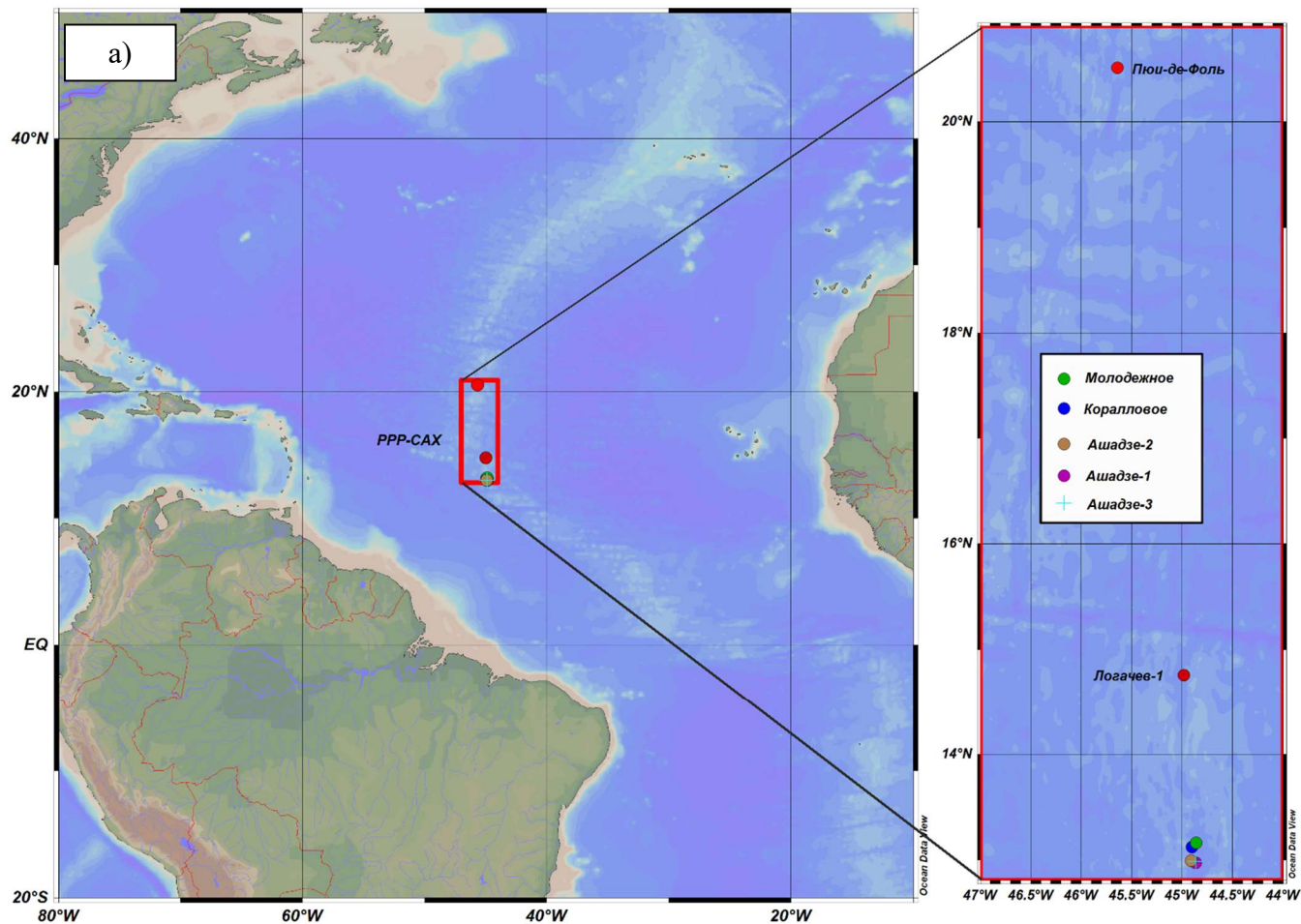


Рисунок 1 – а) Обзорная карта Российского разведочного района Срединно-Атлантического хребта (PPP-CAX); б) График регрессии CH_4/Mg для гидротермальных растворов высокотемпературных источников, приуроченных к перидотитам; в) и г) Гистограмма соотношений CH_4/Mn и коробчатая диаграмма концентраций CH_4 , Mn и соотношений CH_4/Mn в логарифмическом масштабе для гидротермальных растворов полей, приуроченных к базальтам, перидотитам и осадочным отложениям в пределах срединно-океанических хребтов.

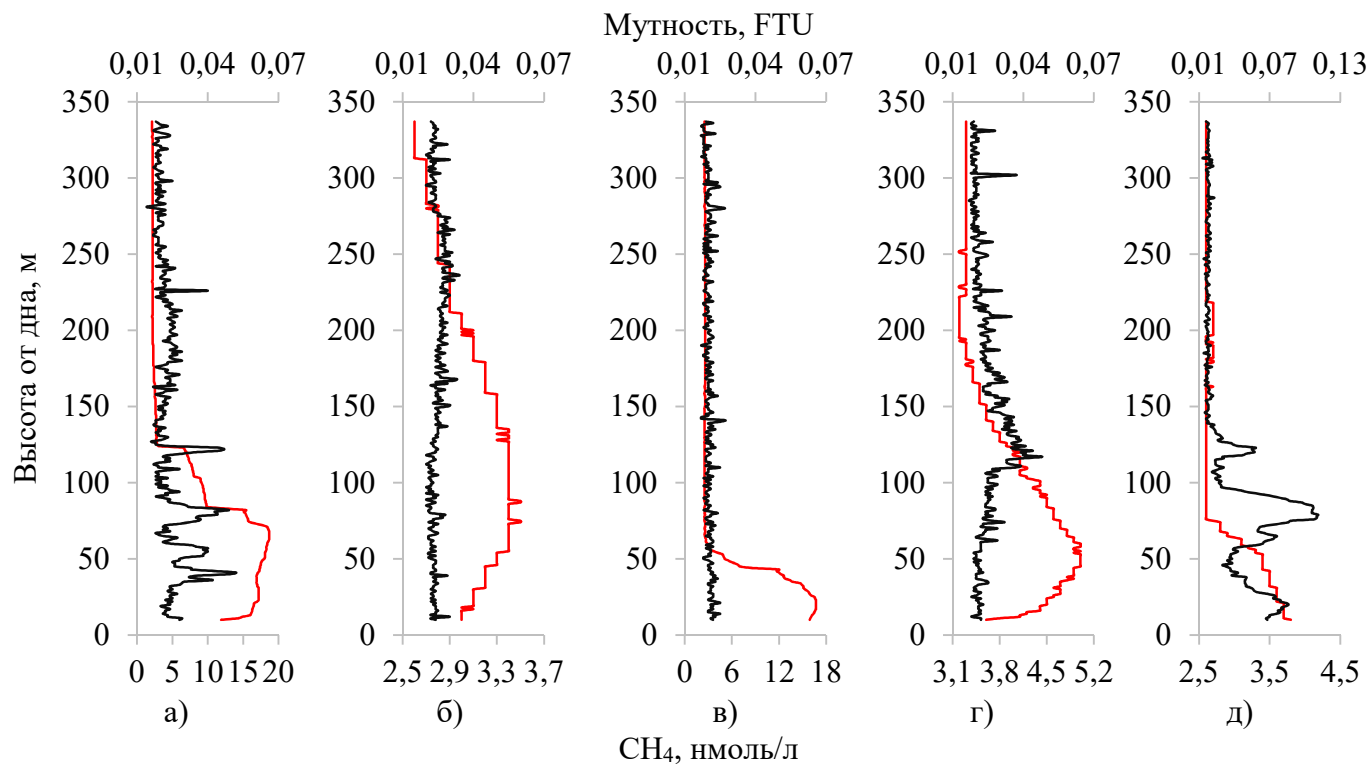


Рисунок 2 – Изменение концентраций растворенного метана (красный) и мутности (черный) с глубиной: а) поле Логачев-1; б) поле Молодежное; в) и г) поле Коралловое; д) поле Пуй-де-Фоль.

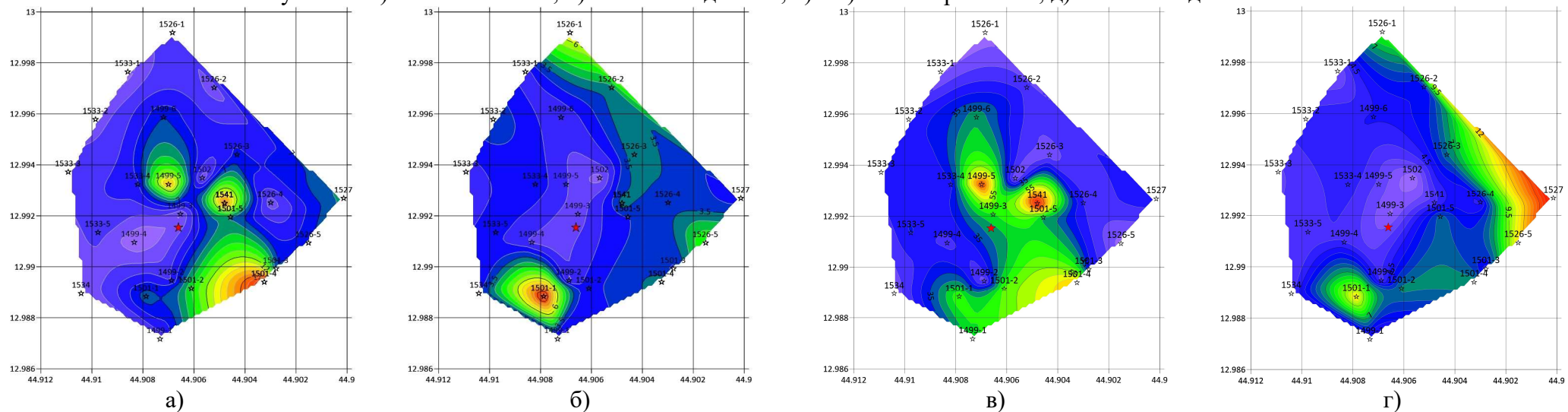


Рисунок 3 – Максимальные концентрации: а) Cu(p); б) Cu(v); в) Zn(p); г) Zn(v), нмоль/л. Красная точка - гидротермальный источник Ашадзе-2

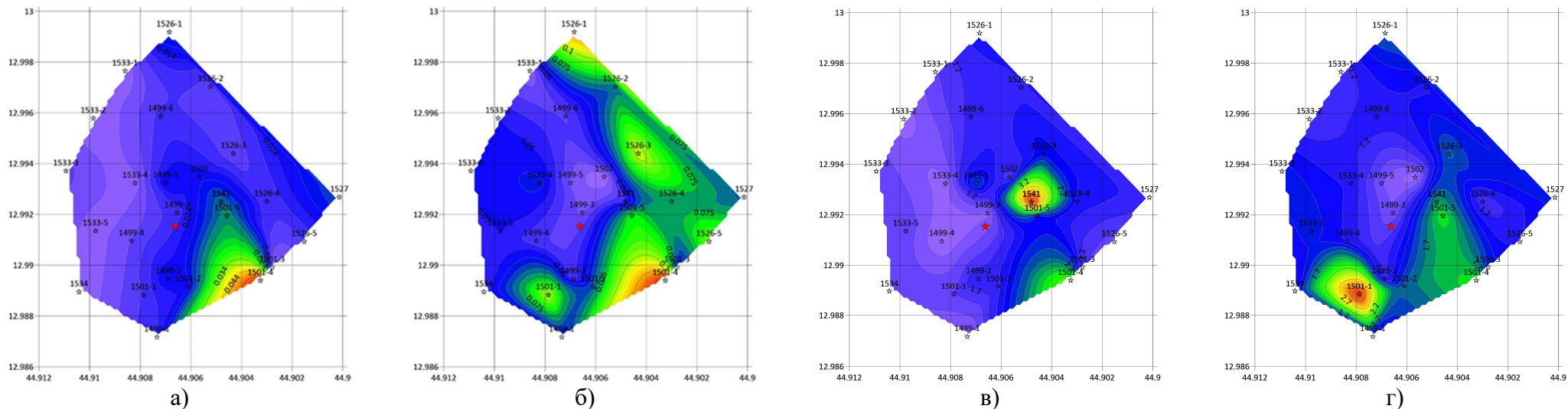


Рисунок 4 – Максимальные концентрации: а) Fe(p); б) Fe(v); в) Mn(p); г) Mn(v), нмоль/л. Красная точка - гидротермальный источник Ашадзе-2

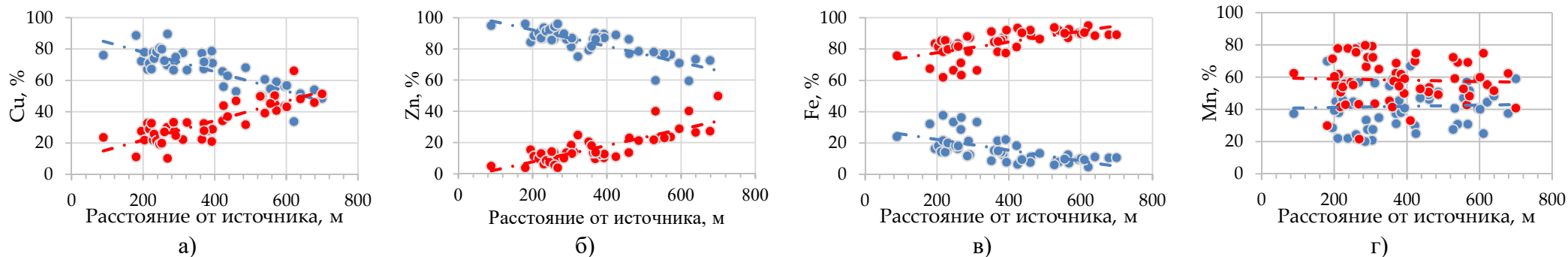


Рисунок 5 – Изменение процентных содержаний растворенных и взвешенных (синие и красные точки, соответственно) меди (а), цинка (б), железа (в) и марганца (г) при удалении от источника.

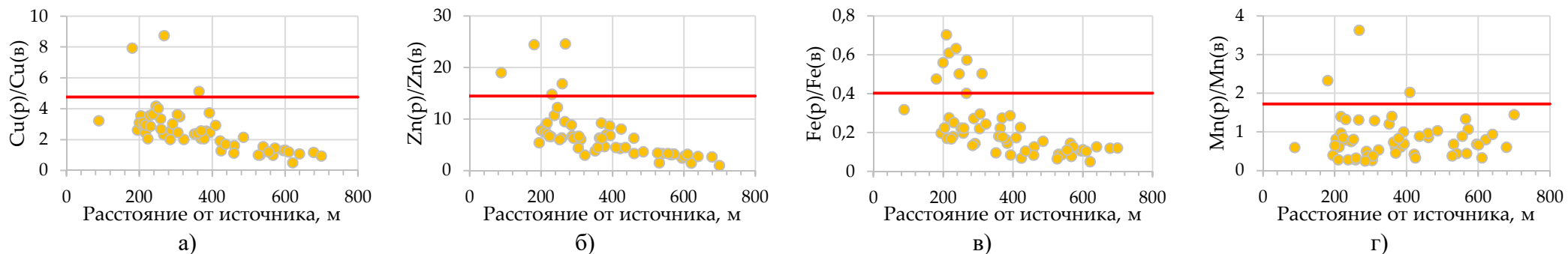
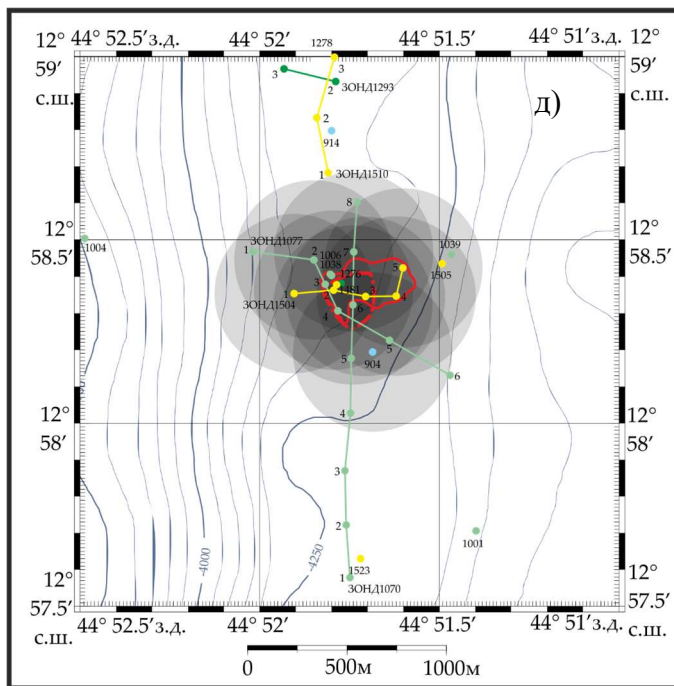
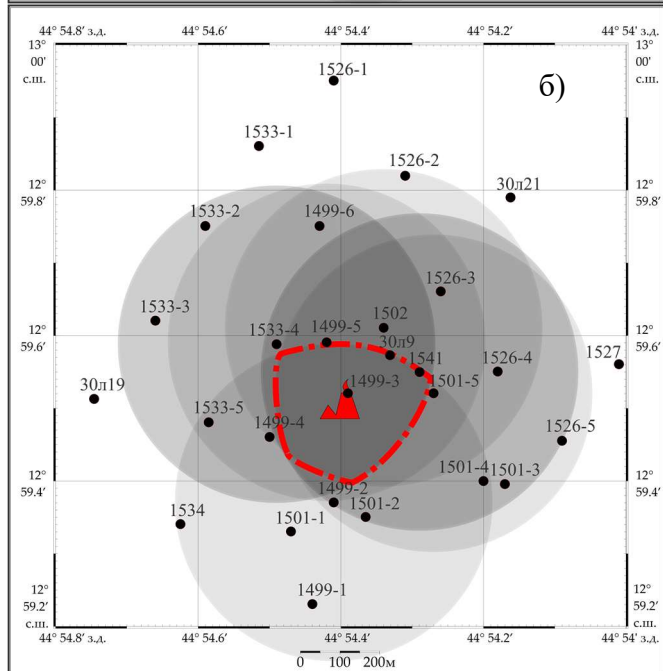
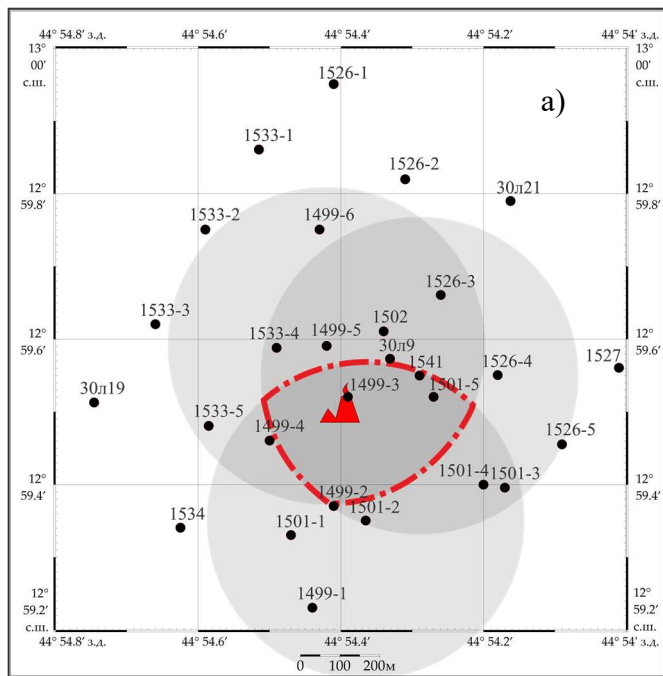


Рисунок 6 – Изменение соотношений $[Me(p)]/[Me(v)]$ для: меди (а), цинка (б), железа (в) и марганца (г) при удалении от источника. Выше сплошной красной линии расположены значения, превышающие три стандартных отклонения



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- Граница гидротермального поля
- - - - Граница прогнозируемой площади
- Станции зондирования и их номера
- Рейс №20 Рейс №22 Рейс №24 Рейс №26
- 904 ● 1001 ● 1276 ● 1523
- Профили зондирования и точки измерений
- 1 —●— 2 —●— 3 —●— 2
- ЗОНД11070 ЗОНД1293 ЗОНД1504

Рисунок 7 – Результаты использования адаптированного метода мультилатерации при прогнозировании площади современной гидротермальной активности в пределах а-г) поля Ашадзе-2: а) Cu(p)/Cu(v); б) Fe(p)/Fe(v); в) Zn(p)/Zn(v); г) Mn(p)/Mn(v); д) поля Ашадзе-1 (по совокупности [pMe]/[vMe])
 Треугольник – точное положение источника Ашадзе-2.

