

Федеральное государственное бюджетное учреждение
“Всероссийский научно-исследовательский институт
минерального сырья им. Н.М. Федоровского
(ФГБУ “ВИМС”)

**ИНФОРМАЦИОННО-
АНАЛИТИЧЕСКИЕ
МАТЕРИАЛЫ:**

**МИРОВЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ
РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕТОДОВ И
МЕТОДИК ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И
ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Серия:
ПОИСКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Москва, ВИМС 2026 г.

Обзор 3-6

**ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОГЕОХИМИИ
ПРИ ПРОИСКАХ РУДНЫХ М-НИЙ «СКРЫТОГО» ТИПА**

РЕДАКТОР-СОСТАВИТЕЛЬ:

В.В. Коротков

СОДЕРЖАНИЕ:

ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОГЕОХИМИИ ПРИ ПРОИСКАХ РУДНЫХ М-НИЙ «СКРЫТОГО» ТИПА (обзор мировой практики, новых тенденций и перспективных направлений)	Стр.
1. Введение.....	4
2. Литература и методология.....	7
2.1. <i>Стратегия поиска и источники данных.....</i>	7
2.2. <i>Критерии отбора и выбор исследования.....</i>	9
2.3. <i>Протокол проверки и процедура отбора.....</i>	10
2.4. <i>Извлечение данных и оценка их качества.....</i>	11
2.5. <i>Обобщение данных и аналитический подход.....</i>	12
2.6. <i>Отчетность и прозрачность.....</i>	13
3. Результаты систематического обзора.....	13
3.1. <i>Выбор исследования и его характеристики.....</i>	13
3.2. <i>Аналитические методы и возможности обнаружения.....</i>	13
3.3. <i>Эмпирические закономерности, о которых постоянно сообщают.....</i>	14
3.4. <i>Гидрогеохимические следы конкретных видов ПИ.....</i>	15
3.4.1. <i>Порфировые системы Си–Мо–Аи.....</i>	15
3.4.2. <i>Вулканогенные массивные сульфидные системы (VMS).....</i>	16
3.4.3. <i>Системы Pb–Zn в осадочных породах (SEDEX/MVT).....</i>	16
3.4.4. <i>Эпидермальные системы Аи–Аг.....</i>	17
3.4.5. <i>Орогенные системы и системы типа Карлин.....</i>	17
3.4.6. <i>Урановые системы.....</i>	17
3.4.7. <i>Литий и редкоземельные элементы (РЗЭ).....</i>	18
3.5. <i>Методы отбора проб, контроля качества и обработки данных.....</i>	18
3.6. <i>Обобщение фактических данных.....</i>	19
4. Обсуждение.....	19
4.1. <i>Принципы и эволюция гидрогеохимии при поисках ПИ.....</i>	19

4.2. Геохимические процессы, влияющие на состав подземных вод.....	22
4.3. Физико-химические факторы, влияющие на подвижность и перенос элементов.....	23
4.4. Гидрогеологические факторы, влияющие на гидрогеохимическое векторирование.....	25
4.5. Ключевые геохимические показатели при поисках месторождений...	27
4.5.1. Элементарные проводники и определение геохимических аномалий..	27
4.5.2. Индикаторы на основе технологических процессов, объединяющие сигнатуры изменений и термодинамическое моделирование.....	28
4.5.3. Усовершенствованные индикаторы, объединяющие изотопные системы и геохимию наночастиц.....	28
4.6. Методологии: от полевых данных к целям ГРР.....	30
4.6.1. План исследования, протоколы отбора проб и полевые измерения...	30
4.6.2. Передовые аналитические методы и оборудование для гидрогеохимической разведки.....	31
4.6.3. Современные стратегии интерпретации данных.....	32
4.7. Глобальное применение важнейших и стратегических ПИ.....	33
4.7.1. Системы из неблагородных металлов.....	34
4.7.2. Системы драгоценных металлов.....	36
4.7.3. Критически важные минеральные системы.....	38
4.8. Обобщение тенденций, проблем и перспективных направлений.....	39
4.8.1. Новые тенденции в области интеграции данных, прогнозного моделирования и технологических инноваций.....	39
4.8.2. Нерешенные проблемы гидрогеохимических поисков.....	40
4.8.3. Процесс гидрогеохимических исследований.....	41
4.8.4. Перспективы и приоритетные направления будущих исследований.	44
5. Выводы.....	45
ИСТОЧНИК.....	46

**ПРИМЕНЕНИЕ ГИДРОГЕОХИМИИ
ПРИ ПРОИСКАХ РУДНЫХ М-НИЙ «СКРЫТОГО» ТИПА**
(обзор мировой практики, новых тенденций и перспективных направлений)

1. Введение

Гидрогеохимия стала важным инструментом современных поисков полезных ископаемых. Особенно это актуально для территорий, где традиционные методы, такие как отбор проб почвы, исследование донных отложений в водоемах и геофизические методы, неприменимы из-за большой мощности перекрывающих пород, сильно выветренного реголита или ограниченной доступности поверхности. Традиционные геохимические методы, применяемые на поверхности, основаны на изучении химического состава горных пород или отложений, находящихся в непосредственной близости от минерализованной зоны. Однако в покрытых или перемещенных почвенно-растительных покровах поверхностные материалы часто отделены от залегающих под ними рудных тел, что затрудняет обнаружение скрытой минерализации. В связи с этим гидрогеохимия представляет собой экономически выгодную и практичную альтернативу, позволяющую анализировать химический и изотопный состав грунтовых вод, которые могут переносить диагностические сигналы от скрытых месторождений в доступные точки отбора проб. В нескольких недавних обзорных и авторитетных публикациях подробно описаны историческое развитие, эмпирические исследования и методологическая эволюция поисковой гидрогеохимии. В этих обзорах эксперты обобщают ключевые концепции, истории из практики и новые аналитические инструменты.

Принцип, лежащий в основе гидрогеохимических поисков, прост, но эффективен. Когда вода проходит через горные породы и осадочные отложения, она взаимодействует с минералами и насыщается растворенными элементами и изотопными сигнатурами, отражающими геологию окружающей среды. При контакте этих вод с рудными телами происходит избирательное выщелачивание и перенос металлов и сопутствующих элементов. Образующиеся химические аномалии распространяются в окружающую гидросферу, формируя трехмерные геохимические ореолы, которые простираются далеко за пределы месторождения. Эти вторичные ореолы рассеяния часто простираются на несколько километров, предоставляя исследователям объекты, значительно превосходящие по размеру само рудное тело. В ходе исследований были зафиксированы аномалии на расстоянии до 10 км от минерализации, что свидетельствует о возможности проведения поисков в региональном масштабе с использованием относительно редкой сети пробоотбора.

В гидрогеохимических исследованиях в качестве индикаторов используются различные элементы, в том числе неблагородные металлы (Cu, Zn, Pb), драгоценные металлы (Au, Ag) и

критически важные или стратегические элементы, такие как уран, молибден, литий и редкоземельные элементы. Их подвижность в грунтовых водах обусловлена сложными геохимическими процессами, в том числе растворением минералов, реакциями адсорбции и десорбции, окислительно-восстановительными превращениями, комплексообразованием и растворимостью, зависящей от pH. Понимание этих процессов крайне важно для точной интерпретации гидрогеохимических аномалий и предотвращения ложноположительных результатов, вызванных естественными колебаниями фоновых значений или антропогенным загрязнением. Для характеристики эволюции подземных вод, оценки взаимодействия воды с горными породами и интерпретации процессов геохимической дисперсии, имеющих отношение к поискам полезных ископаемых, обычно используются термодинамические показатели, такие как индексы насыщенности минералов.

Гидрогеохимия доказала свою эффективность в самых разных геологических и климатических условиях. В Канаде исследования подземных вод помогли обнаружить золото и цветные металлы под ледниковым покровом в пределах щитов. В Австралии гидрогеохимические методы применялись в засушливых регионах с глубоким латеритным реголитом, что помогло в поисках в пределах зеленокаменных поясов и других сложных геологических структур. Кроме того, в Южной Америке гидрогеохимия помогла обнаружить медно-порфировые и литиево-солевые системы как в горных районах, так и во впадинах. Аналогичным образом исследования в Африке и Азии показали, что химический состав подземных вод может указывать на скрытую минерализацию даже в районах с обширным покровным осадконакоплением или ограниченным выходом коренных пород на поверхность. Эти примеры демонстрируют гибкость и надежность гидрогеохимических методов в различных экологических, геологических и климатических условиях.

Методологическая эволюция гидрогеохимии шла параллельно с технологическим прогрессом в области аналитического оборудования. Традиционные колориметрические и спектроскопические методы в значительной степени уступили место или были дополнены ультрамалозлементным многоэлементным анализом с использованием масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС), оптико-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-ОЭС), изотопных методов с высоким разрешением и дополнительными минералогическими характеристиками. Эти инструменты позволяют обнаруживать едва заметные геохимические сигналы и отличать истинную минерализацию от естественной фоновой изменчивости. Интеграция алгоритмов машинного обучения и геопространственного анализа дает возможность интерпретировать сложные наборы данных, повышая точность определения целей и снижая количество ложных срабатываний. Помимо

технических преимуществ, гидрогеохимия безопасна для окружающей среды и проста с точки зрения логистики. Отбор проб воды — малоинвазивный, быстрый и удобный метод, позволяющий охватить большие территории. Двойная польза от гидрогеохимии для поисков и экологического мониторинга повышает стратегическую ценность этого метода в современных проектах по добыче полезных ископаемых.

Несмотря на доказанную эффективность, гидрогеохимические методы не везде применяются одинаково. Страны с развитой геологической инфраструктурой, как правило, включают гидрогеохимию в национальные программы ГРР, опираясь на долгосрочные наборы данных, современные лаборатории и квалифицированный персонал. В то же время в периферийных регионах часто возникают проблемы, связанные с нехваткой исходных данных, дефицитом технических специалистов и слабой институциональной поддержкой. Это препятствует широкому распространению гидрогеохимии даже в тех регионах, где она могла бы принести наибольшую пользу. Устранение этих различий имеет решающее значение для обеспечения равного доступа к современным геологоразведочным инструментам и повышения эффективности поиска полезных ископаемых по всему миру. Актуальность гидрогеохимии в наши дни возрастает в связи с изменениями в методах ГРР - приповерхностные месторождения, выходящие на поверхность в освоенных районах, становятся все более редкими, что побуждает к поиску ресурсов, скрытых под постминералогическим покровом. Сложные геологические условия, в том числе наличие ледниковых отложений, сильно выветренного реголита и аллювиальных равнин, часто делают традиционные методы исследования поверхности неэффективными, поскольку поверхностный материал не связан с коренной породой. Гидрогеохимия позволяет преодолеть это ограничение, используя грунтовые и родниковые воды в качестве естественной среды отбора проб, которая переносит диагностические химические и изотопные сигнатуры от скрытых источников минерализации в доступные точки. Эта способность «видеть сквозь покров» позволяет получить трехмерное представление о распределении руды и стала незаменимой для современных ГРР.

Мировой спрос на полезные ископаемые, в том числе на медь, золото, литий и редкоземельные элементы, еще раз подчеркивает важность гидрогеохимии для обеспечения ресурсной безопасности, развития высокотехнологичных отраслей и перехода к устойчивой энергетике. Комбинируя гидрогеохимические данные с ГИС, дистанционным зондированием и мониторингом в режиме реального времени, исследователи могут разрабатывать более точные модели, повышать эффективность поиска и снижать риски.

В отличие от недавних описательных обзоров, в которых обобщаются экспертные знания и приводятся отдельные примеры из практики, в настоящем исследовании используется

методология систематического обзора, соответствующая стандарту PRISMA-2020, для количественной оценки глобальной доказательной базы в области гидрогеохимических поисков месторождений полезных ископаемых.

Такой подход обеспечивает прозрачность отбора исследований, воспроизводимость извлечения данных и формальную оценку методологического качества и предвзятости в большом массиве эмпирических исследований. В этом обзоре, основанном на стандартизированных аналитических методах, гидрогеохимических средах, поисковых комплексах и стратегиях интерпретации, представленных в 118 исследованиях, прошедших независимую проверку, не ограничиваются описательным синтезом, а предлагается обоснованная, воспроизводимая и подкреплённая количественными данными система оценки эффективности гидрогеохимических исследований.

Таким образом, цели данного обзора заключаются в следующем: (1) обобщить глобальные применения гидрогеохимии в различных минералогических системах; (2) выявить и сформулировать фундаментальные геохимические принципы, лежащие в основе аномалий: их формирование, ключевые элементы, аналитические методы и практические примеры в различных геологических и климатических условиях; (3) изучить новые тенденции, технологические достижения и глобальные проблемы, чтобы понять, как будет развиваться гидрогеохимия в качестве основного инструмента современной, устойчивой и эффективной системы поисков рудных полезных ископаемых.

2. Литература и методология.

Был проведен комплексный и воспроизводимый поиск литературы для выявления рецензируемых исследований, посвященных применению гидрогеохимии при поисках месторождений рудных и стратегических металлов, с особым акцентом на эффективность разведки, процессы геохимической дисперсии и новые подходы, способствующие устойчивому развитию ГРР. Такая систематическая структура позволяет напрямую сравнивать гидрогеохимические методы, аналитические подходы и результаты исследований, что невозможно при использовании только описательного обзора.

2.1. Стратегия поиска и источники данных.

Был проведен всесторонний и систематический поиск литературы в основных международных научных базах данных, включая Scopus, Web of Science Core Collection, ScienceDirect и Google Scholar, с охватом публикаций за период с 1946 года по март 2025 года. Стратегия поиска была разработана таким образом, чтобы охватить рецензируемые эмпирические исследования на стыке гидрогеохимии и разведки полезных ископаемых, и

включала в себя как контролируемые термины, так и ключевые слова в свободном тексте. Основные тематические концепции включали гидрогеохимию, геохимию подземных и поверхностных вод, разведку рудных месторождений и критически важных ПИ, процессы геохимической дисперсии, гидрогеохимические аномалии, элементы-маркеры, многомерный геохимический анализ и экологичные технологии разведки.

Для базы данных Scopus поиск проводился по заголовку, аннотации и ключевым словам автора с использованием вложенной логической структуры следующего вида: TITLE-ABS-KEY («гидрогеохимия» или «геохимия подземных вод» или «геохимия воды») и TITLE-ABS-KEY («разведка полезных ископаемых» или «разведка рудных месторождений» или «критически важные эталлы») и TITLE-ABS-KEY («геохимическая дисперсия» или «гидрогеохимические аномалии» или «элементы-указатели» или «многомерный геохимический анализ»).

В основной коллекции Web of Science поиск проводился с использованием поля «Тема» (Topic, TS), в котором запрашиваются заголовки, аннотации и ключевые слова. Применялась следующая поисковая строка: TS = («гидрогеохимия» или «геохимия подземных вод» или «геохимия воды») и TS = («разведка полезных ископаемых» или «разведка рудных месторождений» или «критически важные минералы») и TS = («геохимическая дисперсия» или «гидрогеохимические аномалии» или «элементы-указатели» или «многомерный геохимический анализ»).

Для ScienceDirect, которая не поддерживает полностью вложенную булеву логику для индексированных полей, через интерфейс полнотекстового поиска применялись комбинации ключевых слов, соответствующие основным концептуальным группам, по следующей структуре: («гидрогеохимия» или «геохимия подземных вод») и («разведка месторождений полезных ископаемых» или «критически важные полезные ископаемые») и («геохимическая дисперсия» или «гидрогеохимические аномалии»). Несмотря на то, что синтаксические ограничения в разных базах данных различались, концептуальная согласованность сохранялась, чтобы обеспечить сопоставимость результатов поиска релевантных исследований.

Google Scholar использовался выборочно для поиска «серой» литературы, публикаций в раннем доступе и релевантных источников, не индексируемых в базах данных по подписке. Из-за ограничений платформы Google Scholar не поддерживает полностью воспроизводимую булеву логику для конкретных баз данных, запросы с ограничением по полям и поиск по контролируемой лексике. Поэтому использовались упрощенные комбинации ключевых слов, отражающие основные поисковые запросы, с использованием фразовых запросов и базовых

булевых операторов. Точная поисковая строка в Google Scholar выглядела так: «гидрогеохимия» и («разведка полезных ископаемых» или «критически важная разведка полезных ископаемых»). и («грунтовые воды» или «химический состав воды»).

Поиск в базе данных дал в общей сложности 235 записей, в том числе в ScienceDirect (n = 101), Google Scholar (n = 56), Scopus (n = 46) и Web of Science (n = 32). После ручного удаления 24 повторяющихся записей 211 публикаций были отобраны по названиям и аннотациям (рис. 1). На этом этапе скрининга было исключено 18 записей (10 — на основании заголовка, 8 — на основании аннотации), в результате чего для полнотекстового поиска осталось 193 записи. К 7 статьям не удалось получить доступ, а 182 полнотекстовые статьи были оценены на соответствие критериям.

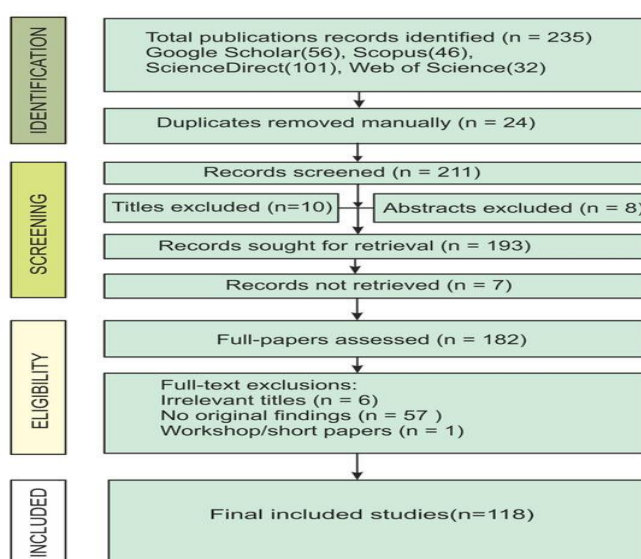


Рис.1. Блок-схема процесса поиска литературы по PRISMA 2020.

После полнотекстовой оценки 64 исследования были исключены, в том числе статьи, не относящиеся к теме обзора (n = 6), публикации, в которых отсутствовали оригинальные эмпирические данные (n = 57), а также краткие статьи или материалы семинаров (n = 1). В итоге 118 эмпирических исследований соответствовали всем критериям включения и были отобраны для качественного обобщения. Процесс идентификации, скрининга и отбора исследований представлен на блок-схеме PRISMA (рис. 1), на которой также указаны причины исключения исследований на этапе полнотекстового анализа.

2.2. Критерии отбора и выбор исследования

После удаления дубликатов записей оставшиеся исследования были просмотрены на уровне заголовков и аннотаций, чтобы оценить их соответствие целям обзора. Исследования были отобраны для дальнейшего рассмотрения только в том случае, если в них явно рассматривалось использование гидрогеохимических данных или методов в контексте поисков

ПИ или критически важных минералов, а также если они были актуальны для таких этапов ГРР, как рекогносцировка, определение границ залегания или геохимическое профилирование под покровом. В отобранных исследованиях должны были быть представлены оригинальные гидрогеохимические данные, методологические основы или подходы к моделированию, которые способствовали бы пониманию систем геохимической дисперсии в контексте геологоразведки.

На этом этапе из выборки были исключены записи, которые представляли собой только тезисы докладов на конференциях без полноценных рецензируемых статей, не содержали достаточной методологической ясности или были посвящены исключительно качеству грунтовых вод, их загрязнению, а также влиянию на окружающую среду и здоровье человека, без явной связи с геологоразведкой. Публикации, посвященные разработке аналитических методов, машинному обучению, ГИС-технологиям или концептуальным обзорам, не связанным с примерами гидрогеохимической разведки месторождений полезных ископаемых, также не были включены в выборку. Публикации на языках, отличных от английского, также не рассматривались. Исследования, соответствующие первоначальным критериям отбора, были допущены к полнотекстовому анализу.

Полнотекстовая оценка позволила дополнительно сузить круг отобранных статей, исключив те, в которых не приводились существенные наборы гидрогеохимических данных, не демонстрировалась их непосредственная применимость для целей разведки полезных ископаемых или в которых гидрогеохимические процессы рассматривались исключительно в рамках экологических или гидрогеологических исследований без привязки к принятию решений в сфере разведки. Справочная литература такого рода была сохранена для контекстуального обсуждения, но исключена из формального процесса извлечения и обобщения данных. Окончательный набор подходящих исследований составил доказательную базу для систематического обобщения, представленного в этом обзоре. Полный процесс отбора исследований представлен на схеме PRISMA (рис. 1).

2.3. Протокол проверки и процедура отбора

Перед извлечением данных был разработан структурированный протокол обзора, определяющий стратегию поиска, критерии отбора, процедуры скрининга и цели обобщения. Два рецензента независимо друг от друга проверяли заголовки и аннотации на соответствие критериям отбора, после чего оценивали полнотекстовые статьи.

Протокол обзора не был зарегистрирован в общедоступном репозитории, поскольку доступные на данный момент регистрационные платформы, такие как PROSPERO, в основном предназначены для систематических обзоров в области здравоохранения и не предусматривают

специализированных процедур для обобщения фактических данных в области наук о Земле. Все этапы отбора и оценки соответствия критериям проводились вручную, без использования автоматизированных инструментов. Отбор исследований осуществлялся в два этапа: сначала проводился скрининг по заголовкам и аннотациям, а затем — полнотекстовая оценка. Все неясные моменты, связанные с соответствием критериям, решались путем обсуждения. Эти процедуры были внедрены для обеспечения прозрачности, последовательности и соблюдения методологических стандартов PRISMA 2020.

2.4. Извлечение данных и оценка их качества

Извлечение данных проводилось с использованием стандартизированного шаблона, разработанного заранее для обеспечения единообразия в исследованиях. Извлеченная информация включала библиографические данные, географические и геологические условия, гидрогеохимические среды, аналитические методы, цели ГПП, основные выводы и указанные ограничения. Один из рецензентов выполнил первичное извлечение данных, которое было независимо проверено вторым рецензентом для обеспечения точности и единообразия. Разногласия разрешались путем обсуждения и достижения консенсуса по принципу «основной изготовитель — вторичный проверяющий». Впоследствии извлеченные данные были систематизированы в рамках единой структуры путем стандартизации терминологии, связанной с гидрогеохимическими средами, аналитическими методами и классификациями минеральных систем. При необходимости приведенные значения и интерпретации были концептуально нормализованы для облегчения сравнения результатов разных исследований. Отсутствующие или неполные данные не вносились в систему, а документировались и учитывались при обобщении.

Чтобы оценить надежность доказательной базы, каждое включенное в обзор исследование было дополнительно проанализировано на предмет методологического качества и потенциального риска предвзятости с использованием адаптированной системы оценки, подходящей для гидрогеохимических и геологоразведочных исследований. При оценке учитывались структура выборки и ее репрезентативность, надежность аналитических данных и отчетность по контролю качества, прозрачность интерпретации данных и четкость связи между гидрогеохимическими сигнатурами и минерализацией. Риск предвзятости оценивался качественно, при этом общее качество исследования учитывалось при обобщении доказательств, а не служило основанием для исключения из обзора. Потенциальная необъективность в представлении данных оценивалась по разнообразию мест проведения исследований, минеральных систем и источников публикаций. Несмотря на то, что формальные статистические методы оценки необъективности в представлении данных

неприменимы, для снижения риска систематической ошибки отбора были отобраны исследования, охватывающие широкий временной диапазон (1946–2025 гг.) и несколько географических регионов.

Поскольку данное исследование представляет собой качественный систематический обзор без метаанализа, не были определены стандартизированные показатели эффекта (например, коэффициенты риска или средние различия). Вместо этого результаты были обобщены на основе описанных гидрогеохимических закономерностей, геохимических индикаторов и показателей эффективности геологоразведочных работ, упомянутых в включенных исследованиях. Кроме того, не проводился анализ чувствительности, поскольку обзор не предполагал количественного синтеза или статистического моделирования. Вместо этого надежность полученных результатов оценивалась качественно, на основе согласованности описанных закономерностей в нескольких независимых исследованиях и геологических условиях.

Достоверность доказательств оценивалась качественно на основе согласованности результатов различных исследований, методологической строгости, аналитической надежности и силы связи между гидрогеохимическими сигнатурами и минерализацией. Учитывая наблюдательный и разнородный характер включенных в обзор исследований, формальная система оценки (например, GRADE) не применялась.

Возможные причины неоднородности результатов исследования были изучены качественно, путем сравнительного анализа ключевых характеристик исследования. Это включало в себя изучение различий в геологических условиях, типах минеральных систем, измеряемых гидрогеохимических параметрах, аналитических методах, пространственных и временных масштабах отбора проб, а также целях исследования. При интерпретации различий в представленных гидрогеохимических показателях и результатах геологоразведочных работ учитывались различия в контексте окружающей среды (например, климатические условия и гидрогеологические режимы) и методологических подходах. Формальная статистическая оценка неоднородности не проводилась из-за качественного и описательного характера доказательной базы.

2.5. Обобщение данных и аналитический подход

Обобщение результатов проводилось с использованием качественного описательного подхода, соответствующего разнородному и преимущественно основанному на наблюдениях характеру включенных в обзор исследований. Собранные данные были систематизированы и сгруппированы по ключевым тематическим областям, включая типы минеральных систем, гидрогеохимические процессы, аналитические методы и результаты геологоразведочных

работ. Сравнительный анализ позволил выявить повторяющиеся закономерности, сходства и различия в гидрогеохимических характеристиках в различных геологических и климатических условиях. При необходимости полученные результаты были структурированы по процессам и видам полезных ископаемых, чтобы облегчить интерпретацию и сравнение между исследованиями. Этот подход был выбран вместо количественного метаанализа из-за значительных различий в дизайне исследований, средах отбора проб, аналитических методах и рассматриваемых переменных, что не позволяло провести значимую статистическую агрегацию данных. Качественный синтез позволил объединить различные данные, сохранив при этом контекстуальные геологические и методологические нюансы, критически важные для оценки эффективности гидрогеохимических исследований.

2.6. Отчетность и прозрачность

Данный систематический обзор полностью соответствует стандартам отчетности PRISMA 2020. В совокупности эти процедуры обеспечивают прозрачность, воспроизводимость и методологическую строгость в соответствии с лучшими практиками проведения систематических обзоров в области гидрогеохимии и разведки полезных ископаемых.

3. Результаты систематического обзора

3.1. Выбор исследования и его характеристики

Поиск в базе данных (за период с 1946 по 2025 год) позволил найти 235 записей. После исключения дубликатов, проверки заголовков и аннотаций, а также оценки полнотекстовых материалов в соответствии с критериями PRISMA для обобщения были отобраны 118 исследований (рис. 1). Отбор и оценка соответствия критериям проводились вручную с использованием заранее установленных критериев.

3.2. Аналитические методы и возможности обнаружения

Подходящие исследования объединены в шесть аналитических групп (табл. 1). ИСП-ОЭС — это надежный метод атомно-эмиссионной спектроскопии, который особенно хорошо подходит для анализа матриц с высоким содержанием растворенных твердых веществ (TDS), таких как соленые грунтовые воды, рассолы и воды с высоким содержанием солей, благодаря высокой устойчивости к матричным эффектам и сниженной чувствительности к нестабильности плазмы. Хотя пределы обнаружения ICP-MS выше, чем у ICP-OES, ICP-OES остаются эффективным и широко применяемым инструментом скрининга и количественной оценки основных и микроэлементов в условиях разведки, где соленость проб превышает практический допуск ICP-MS, а значительное разбавление может поставить под угрозу эффективность анализа. Метод HR-ICP-MS обеспечивает чувствительность на уровне суб-ppb

(ppq) и улучшенное разрешение при наличии помех. Метод ICP-OES предпочтительно использовать для матриц с высоким содержанием растворенных твердых веществ (допустимо до ~30%) с пределами обнаружения от высоких до низких значений в частях на миллиард [10,45]. MS-ICP-MS/изотопный масс-спектрометрический анализ позволяет с высокой точностью определять радиогенные/стабильные изотопы (Pb, Sr; $\delta^{65}\text{Cu}$, $\delta^{98}\text{Mo}$) для отслеживания источников/процессов [2,33,43,46,47]. Сообщается об использовании метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (spICP-MS) и просвечивающей электронной микроскопии для обнаружения и характеристики наночастиц, связанных с рудами, в грунтовых водах. Ионная хроматография остается стандартным методом количественного определения основных анионов, в том числе Cl^- и SO_4^{2-} , а также галогенидов, таких как Br^- и I^- , которые помогают определить источники жидкости и динамику солености.

Табл. 1.

Сравнительный обзор аналитических методов.

Technique	Principle	Typical Detection Limits	Throughput	Matrix Tolerance (TDS)	Relative Cost	Primary Exploration Application
Flame AAS	Atomic Absorption	ppm–high ppb	Single element (Sequential)	High	Low	Targeted analysis for base metals in contaminated or high-concentration settings
GFAAS	Atomic Absorption	ppb–low ppb	Single element (Sequential)	Moderate	Low-Medium	Analysis of specific trace elements (e.g., Pb, Cd, Au) where ICP is unavailable
ICP-OES	Optical Emission	high ppb–low ppb	Multi-element (Simultaneous)	Very High (up to 30%)	Medium	Regional screening for major and trace elements; analysis of high-salinity waters (brines, wastewaters)
ICP-MS	Mass Spectrometry	ppb–ppt	Multi-element (Simultaneous)	Low (~0.2%)	High	Standard for most exploration surveys; ultra-trace pathfinders (Au, PGE), REE, isotopes
HR-ICP-MS	Mass Spectrometry	ppt–sub-ppt (ppq)	Multi-element (Simultaneous)	Low (~0.2%)	Very High	Research applications; resolving complex interferences; ultra-trace analysis for concealed deposits
Isotope MS	Mass Spectrometry	Isotopic Ratios (%)	Varies	Varies	High	Source and process fingerprinting; direct vectoring to ore
TEM/spICP-MS	Electron Microscopy/Mass Spectrometry	Nanoparticle analysis	Single particle	Low	Very High	Direct detection and characterization of ore-related solid particles in groundwater

3.3. Эмпирические закономерности, о которых постоянно сообщают

В зависимости от климата и типа отложений можно выделить три закономерности, основанные на наблюдениях.

(1) Зональные ореолы: проксимальное обогащение менее подвижных катионов (Cu, Pb, Zn) и дистальное обогащение более подвижных оксоанионов (Mo, Re, As, Se) — типичные

явления, которые можно отобразить на карте. Для уточнения векторов часто используются соотношения элементов с разной подвижностью.

(2) Систематическая связь с химическим составом воды: в кислых водах наблюдается повышенное содержание растворенных Cu/Zn, в то время как содержание Mo/As/U обычно повышено в водах с нейтральной или щелочной реакцией, с карбонатным буфером; резкие скачки содержания растворенного урана совпадают с окислительно-восстановительными границами.

(3) Влияние солености и климата на благородные металлы: в засушливых, засоленных районах в неглубоких грунтовых водах часто обнаруживается серебро (а местами и золото), в то время как в пресных водах с окислительной средой и почти нейтральным уровнем pH чаще встречаются локальные аномалии растворенного золота. Широко распространено явление ослабления катионных металлов в потоке за счет их адсорбции на (оксигидроксидах) железа и марганца и вторичного осаждения минералов. Примеры конкретных месторождений показаны на рисунке 2.

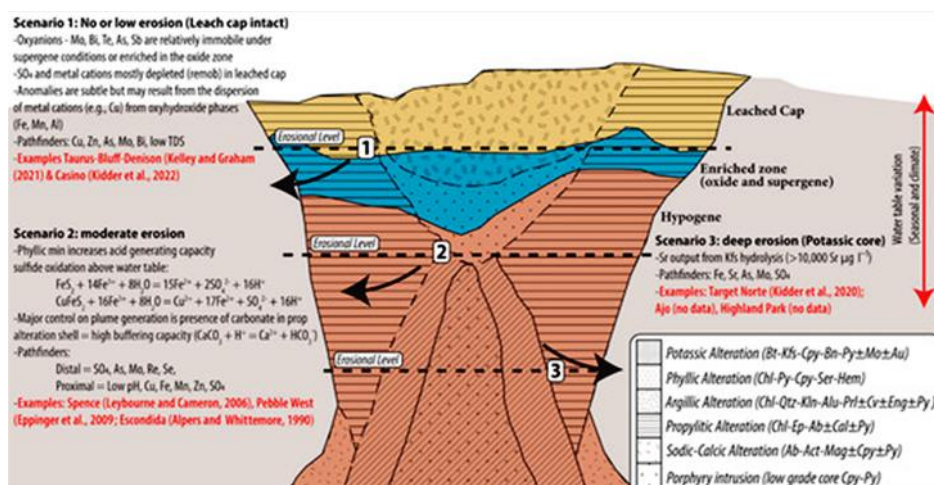


Рис. 2. Схемы гидрогеохимической дисперсии, связанные с порфиристыми системами на разных стадиях эрозии.

3.4. Гидрогеохимические следы конкретных видов ПИ

3.4.1. Порфиристые системы Cu–Mo–Au

При разведке месторождений и в масштабах района часто обнаруживается проксимальный ореол Cu–Zn–Co с охватывающим его дистальным шлейфом Mo–Re–As–Se протяженностью в несколько километров (рис. 2). В Пebbле (Аляска) в кислых водах над тонким слоем отложений присутствуют Cu–Cd–Re–SO₄²⁻, а в водах с почти нейтральной реакцией над более толстым слоем отложений — Mo–As–Sb–W в следовых количествах. В Спенсе (Чили) зарегистрированные диапазоны подземных вод включают Cu, обычно ~ 10³ мкг / л (локальный максимум 28 991 мкг / л), Mo, часто > 100 мкг / л, с pH ≈ 4,7 и TDS > 25 000 мг / л в частях шлейфа; Re обнаружен с уклоном вниз на сверхмалых уровнях.

3.4.2. Вулканогенные массивные сульфидные системы (VMS)

Исследования озер в районах вечной мерзлоты и бореальных зонах неизменно показывают очень низкий уровень содержания растворенных металлов (часто менее 2 частей на миллиард) и более выраженные аномалии цинка по сравнению с медью в растворенной фракции.

3.4.3. Системы Pb–Zn в осадочных породах (SEDEX/MVT)

Исследования показывают, что в нейтральных, карбонатно-буферизованных почвах полезно использовать нормализацию (например, Zn/Cl^- , SO_4^{2-}/Cl^-) и картирование аномалий радиогенных изотопов свинца под почвенным покровом. Репрезентативные модели приведены в таблице 2.

Табл. 2.

Краткое описание глобальных моделей гидрогеохимической разведки.

Commodity/ Deposit Type	Location/ Environment	Sample Medium	Key Indica- tors/Pathfinder Suite	Dominant Geochemical Process	Key Innova- tion/Outcome
Base Metals					
VMS (Cu, Zn)	Canadian Shield (Permafrost, Pristine)	Lake Water	Zn > Cu	Sulphide oxidation in low-salinity, acidic-to-neutral water; Adsorption on Fe-oxides.	Helicopter-based rapid sampling system; Model for detailed follow-up surveys.
Porphyry Cu	Puerto Rico (Tropical, High Weathering)	Stream Water	Regional: SO_4^{2-} Detailed: Cu, Zn, F ⁻	Tiered approach using regional (SO_4^{2-}) and detailed (Cu, Zn) pathfinders are effective.	Pathfinder Element Suite model for high-weathering environments.
Pb-Zn	North Wales, UK (Temperate, Complex)	Stream Water	Multi-element suites (Pb, Zn, Cd, As)	Multiple overlapping signals: Mineralization, bedrock weathering, atmospheric, and anthropogenic inputs.	Model for exploration in complex terrains; Call for integration of multi-source data in GIS.
Cu-Au (IOCG)	Mumbwa, Zambia (Deeply weathered)	Groundwater	As, Mo, Fe, Mn, Zn, $\delta^{98}Mo$, $\delta^{65}Cu$	Leaching of alteration halo and ore; Isotopic fractionation during weathering.	Highlighted the utility of non-traditional stable isotopes for fingerprinting and vectoring.
Precious Metals					
Epithermal Au-Ag	Great Basin, USA (Arid, Saline)	Shallow Groundwater	Ag	Supergene oxidation; Transport as chloride complexes in saline water.	Predictive modelling of mineral solubility; Ag in groundwater as a pathfinder for buried deposits.
Epithermal Au	Sardinia, Italy (Semi-Arid, Neutral pH)	Stream Water	As, Sb > Au	Limited mobility of Au in near-neutral freshwaters; greater mobility of As and Sb.	Model for prospect-scale targeting using robust pathfinders for a restricted Au halo.

Critical Minerals					
Roll-Front U	Texas/Wyoming, USA (Semi-arid)	Groundwater	Saturation Index (SI) for Uraninite	Redox-controlled dissolution and precipitation of uranium at a mobile front.	Thermodynamic Modelling (SI maps) are superior to raw concentration maps for target delineation.
Unconformity U	Pine Creek, Australia (Monsoonal)	Groundwater	Normalized Magnesium (NMg)	Leaching of distinctive Mg-rich alteration halo around the orebody.	Alteration Geochemistry Signature (NMg ratio) is a robust indicator, especially where U is immobile.
Lithium Brine	Andean Plateau, South America (Hyper-arid)	Brine	Direct Li concentration; Low Mg/Li ratio	Evaporative concentration in a closed basin with a Li source.	Direct resource evaluation model based on major ion ratios for economic viability.
REE	Carbonatite-Hosted (Sardinia, Italy)	Groundwater	REE Fractionation Patterns (HREE enrichment)	HREE enrichment via Carbonate complexation provides a vector to mineralization.	Use of normalized REE patterns as a vectoring tool.

3.4.4. Эпидермальные системы Au–Ag

В засушливых солончаковых бассейнах (например, в некоторых частях Большого Бассейна) при исследовании неглубоких грунтовых вод обнаруживаются обширные ореолы рассеяния серебра. В окислительных системах с почти нейтральным уровнем pH (например, на Сардинии) аномалии растворенного золота обычно находятся на глубине $\leq \sim 0,5$ км, в то время как As/Sb оставляют более четкие водные следы.

3.4.5. Орогенные системы и системы типа Карлин

Исследования континентальных территорий и территорий, прилегающих к лагерям (например, кратон Йилгарн), показывают, что фоновое содержание растворенного золота составляет порядка нескольких наногرامмов на литр, а локальные максимумы достигают ~ 2 мкг/л (плотина Каросуэ) и ~ 52 нг/л (Сент-Айвс). Часто наблюдается совместное присутствие As, Sb, Te, W вблизи золотоносных систем. В районах с формациями типа Карлин комплексы подземных вод, содержащих As, Sb, Hg, Tl, стабильно обнаруживаются там, где растворенное золото встречается редко. На примере месторождения Гетчелл показано типичное распределение гидрохимических фаций.

3.4.6. Урановые системы

Для месторождений с фронтальным залеганием уранинита картирование расчетного индекса насыщенности (SI) уранинита позволяет более эффективно определять рудные тела, чем картирование растворенного урана. Для систем, связанных с несогласиями, в качестве

гидрогеохимических индикаторов используются повышенные значения соотношения $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, радиевые изотопные аномалии и нормализованные сигналы магния (NMg).

3.4.7. Литий и редкоземельные элементы (РЗЭ)

При оценке литиевых рассолов в качестве основных показателей используются абсолютное содержание лития и соотношение магния и лития; сообщается о распространении лития, рубидия и цезия в неглубоких грунтовых водах вблизи пегматитов литиево-цезиевого типа. Для редкоземельных элементов векторы описываются с помощью нормализованных диаграмм распределения редкоземельных элементов с фракционированием легких и тяжелых редкоземельных элементов и аномалиями Eu/Ce.

3.5. Методы отбора проб, контроля качества и обработки данных

Полевые протоколы обычно включают в себя промывку контейнеров кислотой, фильтрацию растворенной фракции через фильтр с размером пор 0,45 мкм, подкисление аликвот катионов и следовых количеств, использование специальных бутылок для анионов, а также измерение pH, окислительно-восстановительного потенциала, электропроводности и температуры на месте. Сообщается о применении беспилотных летательных аппаратов для отбора проб и перистальтических насосов для фильтрации точечных источников в удаленных районах. Рабочие процессы обработки данных часто учитывают композиционную природу геохимических данных по водным ресурсам и, следовательно, применяют преобразования логарифмического соотношения (clr) перед PCA или кластерным анализом. Также широко используется термодинамическое моделирование путем расчета индексов насыщения и классификации металлов по кодам, например, PHREEQC. Эти подходы часто сочетаются с интеграцией других перспективных слоев на основе ГИС. Такие рабочие процессы хорошо описаны в литературе (краткое описание подходов к интерпретации представлено в таблице 3.

Табл. 3.

Сравнение методологий интерпретации данных.

Methodology	Primary Function	Strengths	Limitations	Data Requirements
Single-Element Thresholding	Identify statistical outliers in a single variable's distribution.	Simple, fast, and easy to visualize (on maps)	Highly prone to false anomalies; ignores covariance and underlying processes	Single-element concentration data.
Pathfinder Ratios	Normalize for background effects or highlight specific processes.	Can reduce effects of dilution/evaporation; can enhance mineralization signature	Can be misleading if the denominator is not a true conservative tracer for the process being corrected	At least two element concentrations.
Thermodynamic Modelling (SI)	Model mineral-solution equilibria and element speciation.	Provides a process-based chemical framework; can identify prospective waters near saturation (SI \approx 0) even with low concentrations	Assumes equilibrium, which is often not met; highly sensitive to quality of Eh, pH, and temperature data	Full major and minor analysis, plus field parameters (pH, T, Eh).
Multivariate Statistics (PCA/Cluster)	Deconstruct complex datasets to identify dominant processes and group samples by genetic type.	Identifies underlying processes (weathering, pollution); allows for context-specific anomaly definition, reducing false anomalies	Requires a large, complete dataset; results can be abstract and require expert interpretation	Comprehensive multi-element dataset for a large number of samples.
Isotopic Analysis	Trace the source of solutes and the processes they have undergone.	Provides direct, unambiguous information on source (e.g., radiogenic Pb) and process (e.g., UAR); can provide temporal data (e.g., Ra isotopes)	Higher analytical cost; requires specialized laboratory facilities and expert interpretation	High-precision isotope ratio data.
Geospatial Integration (GIS)	Spatially integrate and analyse multiple georeferenced datasets to identify converging evidence.	Reveals spatial relationships between anomalies and geological features; enhances target confidence	Effectiveness depends on the quality and relevance of the integrated datasets.	Georeferenced hydrogeochemical, geological, geophysical, and remote sensing data.

3.6. Обобщение фактических данных

Собранные исследования подтверждают, что: (1) в различных гидрогеологических условиях наблюдаются зональные дисперсионные ореолы с предсказуемым распределением элементов; (2) сверхчувствительные аналитические методы позволяют обнаружить едва заметные следы; (3) стандартизированные полевые/лабораторные протоколы в сочетании с многомерным и геопространственным анализом широко применяются для выявления водных аномалий.

В целом достоверность доказательств по хорошо изученным гидрогеохимическим процессам (например, окислению сульфидов, влиянию рН и окислительно-восстановительного потенциала, ореолам рассеяния) считается умеренной или высокой, что подтверждается стабильными наблюдениями в различных геологических условиях. Новые подходы, такие как изотопная геохимия и анализ наночастиц, выглядят многообещающе, но их достоверность сравнительно ниже из-за ограниченности наборов данных и несовершенства методологий.

4. Обсуждение

4.1. Принципы и эволюция гидрогеохимии при поисках ПИ

Эффективность гидрогеохимии как метода геологоразведки обусловлена рядом взаимосвязанных геохимических процессов, в результате которых химический состав месторождения передается в окружающую водную среду. Глубокое понимание этих процессов — от первоначального высвобождения рудообразующих элементов в источнике до их переноса и изменения в процессе движения грунтовых вод и последующего ослабления — является основой для разработки эффективных стратегий исследования и точной интерпретации гидрогеохимических данных. Эти механизмы также объясняют, почему грунтовые воды могут обнаруживать глубоко залегающие или скрытые залежи полезных ископаемых, как показали исследования в условиях гиперзасушливых территорий и сложных геологических условий.

Гидрогеохимия как отдельная научная дисциплина существует уже более 70 лет. Для нее характерны циклы повышенного интереса и относительного затишья, каждый из которых определяется соответствием исследовательских задач имеющимся технологиям. Современная геохимия зародилась в 1930–1940-х годах благодаря систематической работе российских геохимиков, которые впервые применили концепцию «физико-химической разведки», официально протестировав использование химических свойств воды для обнаружения вторичных дисперсных частиц в рудных телах. Одно из первых задокументированных исследований было проведено в 1941 году А. Резниковым, который с помощью колориметрических реагентов на основе дитизона определял следовые концентрации

неметаллов в воде и успешно выявлял аномалии, связанные с полиметаллическими месторождениями на Алтае.

Значительный всплеск интереса к ней произошел в 1970-х годах в связи с глобальными поисками урана, обусловленными очевидным «соответствием проблемы и технологии». Уран очень подвижен в водной среде, а аналитические методы того времени, такие как флуориметрия и подсчет запаздывающих нейтронов, были достаточно чувствительными, чтобы обнаруживать его аномальное содержание. Крупномасштабные программы, такие как «Гидрогеохимическая разведка и исследование донных отложений в водотоках» (Hydrogeochemical and Stream Sediment Reconnaissance, HSSR) в Северной Америке, оказались весьма успешными и подтвердили ценность этого метода для поиска конкретных полезных ископаемых.

После этого периода интерес к данной дисциплине стал угасать, особенно по мере того, как геологоразведка переключалась на менее мобильные полезные ископаемые, такие как золото. Существующим аналитическим технологиям, таким как атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС), часто не хватало чувствительности для обнаружения едва заметных аномалий, возникающих из-за присутствия этих элементов, что ограничивало практическую ценность метода. Это привело к «кризису доверия» в начале 1980-х годов, когда исследователи начали понимать, что простого измерения концентрации металла в воде зачастую недостаточно и это приводит к противоречивым или вводящим в заблуждение результатам. Ранние методы часто давали сбой, поскольку основывались на простом пороговом значении аномалии для таких элементов, как уран или медь, без учета сильного влияния местной геохимической среды. Например, исследования показали слабую корреляцию между содержанием растворенного урана и наличием известного рудного тела, поскольку локальные окислительно-восстановительные условия и pH сильнее влияют на растворимость урана, чем близость к источнику. Этот кризис потребовал выхода за рамки простого поиска аномалий и привел к фундаментальному сдвигу парадигмы. Фокус научных исследований сместился с вопроса о том, какова была концентрация, на более сложный вопрос: почему она была именно такой. Этот переход от эмпирических измерений к пониманию процессов на основе теории дал толчок к появлению новых интерпретационных подходов, которые и сегодня занимают центральное место в этой дисциплине. Чтобы преодолеть ограничения, связанные с простыми данными о концентрации, были разработаны три разные, но взаимодополняющие стратегии: использование компьютерных моделей для расчета индекса насыщенности (ИС) минерала — термодинамической меры стабильности; анализ химического состава ореолов измененных пород с использованием соотношений основных ионов; а также использование набора

мобильных элементов-маркеров для определения более широкого спектра характеристик минерализующей системы.

Современное возрождение гидрогеохимии стало возможным благодаря сочетанию новых технологий и проблем. Современная задача поиска месторождений, скрытых глубоко под осадочными породами, привела к острой необходимости в методах глубинного зондирования, а сопутствующая революция в аналитической геохимии стала решением этой проблемы. Разработка и коммерциализация метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) в 1980-х годах и его последующее усовершенствование коренным образом изменили эту область. Способность ICP-MS и ее вариантов с высоким разрешением обеспечивать быстрый многоэлементный анализ при чрезвычайно низких пределах обнаружения вплоть до частей на триллион (ppt) или наногаммов на литр (нг л^{-1}) значительно расширила область обнаружения месторождений. Этот технологический прорыв преодолел исторические ограничения и позволил обнаруживать едва заметные аномалии в глубоко залегающих системах, которые ранее было невозможно выявить. Таким образом, гидрогеохимия стала привычным и экономически эффективным инструментом современных ГРП. Эта история демонстрирует четкую закономерность: развитие гидрогеохимии как метода решения геологоразведочных задач обусловлено технологическим прогрессом. Это позволяет предположить, что будущие прорывы также будут связаны с аналитическими и вычислительными инструментами следующего поколения.

На рисунке 3 показано глобальное распределение основных полезных ископаемых в зависимости от климатических зон по классификации Кёппена — Гейгера.

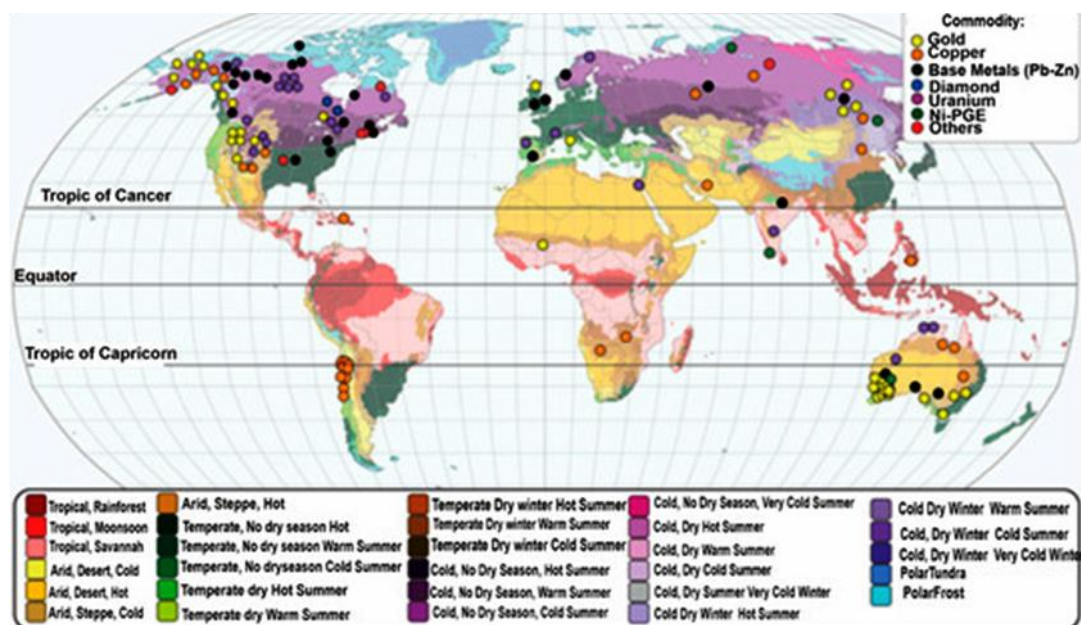


Рис. 3 Глобальное распределение основных месторождений на основе классификации климата Кёппена — Гейгера

Хорошо видны явные концентрации в регионах с умеренным и холодным континентальным климатом, а также вторичные скопления в засушливых и тропических поясах. Такое климатическое разнообразие напрямую связано с историческим развитием гидрогеохимии. Гидрогеохимия как научная дисциплина существует уже более семидесяти лет. Для нее характерны циклы активного развития и периоды упадка, каждый из которых обусловлен тем, насколько хорошо аналитические технологии соответствуют геохимическим задачам, возникающим в различных климатических условиях. Первые успехи, подобные тем, что были достигнуты российскими геохимиками в 1930-х годах, и бум в области разведки урановых месторождений в 1970-х, были достигнуты в основном в тех регионах, где движение грунтовых вод и физико-химические условия обеспечивали надежную мобилизацию целевых элементов. Однако по мере того, как геологоразведка распространялась на тропические и засушливые регионы, где сложная гидрология и экстремальные условия выветривания изменяли пути распространения металлов, стали очевидны ограничения ранних технологий, что привело к «кризису доверия» в 1980-х годах. Климатические особенности (рис. 3) подтверждают главную историческую закономерность: гидрогеохимия всегда была ограничена как окружающей средой, так и технологическими возможностями. Последующее развитие высокочувствительного многоэлементного масс-спектрометрического анализа с индуктивно-связанной плазмой позволило в значительной степени преодолеть эти ограничения и обнаруживать аномалии на уровне ppt в гораздо более широком диапазоне климатических условий. Таким образом, современное возрождение гидрогеохимии отражает новый подход к «сочетанию проблемы и технологии», при котором передовые аналитические инструменты используются для решения задач, связанных с подземными минеральными системами в различных климатических зонах.

4.2. Геохимические процессы, влияющие на состав подземных вод

Формирование гидрогеохимической аномалии начинается с непосредственного взаимодействия воды с минералами. Этот процесс включает в себя растворение, гидролиз и окисление. В то время как фоновый химический состав любого образца грунтовых вод представляет собой совокупность характеристик, полученных из различных источников, включая атмосферное подпитывание и растворение неминерализованных вмещающих пород, в контексте разведки полезных ископаемых доминирующим процессом является избирательное выщелачивание элементов из рудного тела.

Во многих наиболее значимых в мире системах добычи нерудных и драгоценных металлов основным механизмом мобилизации этого элемента является окисление сульфидных

минералов. При контакте сульфидных минералов, таких как пирит (FeS_2) или халькопирит (CuFeS_2), с насыщенными кислородом грунтовыми водами происходит их окислительное выветривание. Эта реакция имеет решающее значение, поскольку в окружающую воду попадают три ключевых компонента: растворенные металлы (такие как Cu, Zn) и сульфат (SO_4^{2-}), высокоподвижный и стабильный индикатор процесса, а также кислота (H^+), которая резко меняет локальную химическую среду и ускоряет растворение других минералов. Этот процесс часто сопровождается выделением тепла, что особенно важно в холодных регионах, таких как Канадский щит, где выделяемое тепло может приводить к образованию талых каналов в вечной мерзлоте, усиливая движение воды и распределение элементов даже при отрицательных температурах.

4.3. Физико-химические факторы, влияющие на подвижность и перенос элементов

После того как элемент высвобождается из минерала, в котором он содержится, его способность перемещаться в воде, то есть подвижность, зависит от ряда внешних физико-химических условий. Двумя основными переменными, определяющими большинство геохимических реакций, являются pH (показатель кислотности или щелочности) и Eh (окислительно-восстановительный потенциал). pH воды является критическим показателем, определяемым балансом между образованием кислоты в результате окисления сульфидов и естественной буферной способностью вмещающих пород. В регионах с преобладанием литологии с низким содержанием щелочей, таких как некоторые граниты, вода становится кислой ($\text{pH} < 5,5$), что значительно повышает растворимость и подвижность многих катионов металлов, включая медь (Cu), цинк (Zn) и алюминий (Al). И наоборот, в геологических формациях, содержащих карбонатные породы, такие как известняк, кислота нейтрализуется, в результате чего образуются почти нейтральные или даже слабощелочные воды, которые ограничивают подвижность этих катионов, но способствуют подвижности элементов, образующих стабильные растворимые оксоанионы, таких как молибден (Mo), мышьяк (As) и уран (U).

Окислительно-восстановительный потенциал (Eh) имеет первостепенное значение для элементов, которые могут существовать в нескольких валентных состояниях. Классический пример — уран, который в окислительных условиях хорошо растворяется и подвижен в виде шестивалентного уранила (UO_2^{2+}), но в восстановительных условиях становится практически нерастворимым и выпадает в осадок в виде минералов U(IV), таких как уранинит (UO_2). Таким образом, поиск некоторых типов урановых месторождений по сути сводится к поиску этих окислительно-восстановительных границ. Подвижность ионов металлов также значительно повышается за счет образования растворимых водных комплексов с различными лигандами,

которые естественным образом присутствуют в воде. Этот процесс комплексообразования может поддерживать растворенное состояние металла в условиях, при которых он обычно выпадает в осадок. Природа доминирующего лиганда обеспечивает естественное геохимическое разделение элементов при их переносе. Например, в слабосоленых и кислых водах Канадского щита относительная подвижность недргоценных металлов в значительной степени зависит от pH, поэтому цинк более подвижен, чем медь. В то же время в засушливых соленых грунтовых водах Большого Бассейна высокая концентрация хлоридов (Cl^-) становится доминирующим фактором. Здесь такие металлы, как золото (Au) и серебро (Ag), образуют стабильные растворимые хлоридные комплексы (например, AuCl_2^- и AgCl_2^-), что значительно повышает их подвижность и позволяет им переноситься на большие расстояния от источника. Это показывает, что «лучший проводник» — это не внутреннее свойство элемента, а контекстно-зависимая переменная, определяемая местной гидрогеохимической средой.

Образование дисперсионных ореолов и процессы восстановления

Расстояние, на которое элемент может переместиться от источника, его траектория рассеивания в конечном счете ограничены процессами восстановления, или «приемниками», которые выводят его из раствора. Взаимодействие процессов мобилизации, переноса и ослабления приводит к формированию структурированных зональных геохимических аномалий, или ореолов рассеяния, в системах подземных и поверхностных вод. Геохимическая дисперсия — это не просто процесс разбавления, а активный процесс геохимического фракционирования, в ходе которого элементы пространственно разделяются в зависимости от их химических свойств, образуя предсказуемые закономерности, которые можно использовать для векторизации.

Наиболее значимым процессом ослабления во многих пресноводных системах является адсорбция катионов растворенных металлов на поверхности твердых частиц, особенно свежесоздаваемых гидроксидов железа (Fe) и марганца (Mn). Этот процесс сильно зависит от pH и способствует геохимическому разделению элементов. Например, медь склонна к адсорбции при более низком уровне pH, чем цинк, что объясняет, почему аномалии меди часто менее обширны, чем аномалии цинка, образовавшиеся из того же сульфидного источника. Другой основной механизм ослабления сигнала — осаждение вторичных минералов, которое происходит, когда вода становится перенасыщенной по отношению к определенной минеральной фазе из-за изменения физико-химических условий по пути движения.

Эти процессы ослабления часто рассматриваются как ограничение, но на самом деле они представляют собой механизм концентрации, при котором аномалия переходит из растворенной фазы в твердую. Например, адсорбция металлов на оксидах железа и марганца

приводит к тому, что аномалия перемещается во взвешенные частицы или в активный донный осадок, открывая новые возможности для геологоразведки. В результате этого динамического взаимодействия образуются характерные зональные геохимические следы. Менее подвижные элементы, которые легко выводятся из раствора, такие как медь, свинец и цинк, как правило, образуют проксимальные аномалии ближе к рудному телу. В отличие от них, высокоподвижные элементы, образующие стабильные растворимые оксианионы, такие как молибден, рений и мышьяк, в меньшей степени подвержены этим процессам и могут распространяться на значительные расстояния, образуя обширные дистальные аномалии, которые представляют собой гораздо более перспективный объект для разведки. Таким образом, наиболее ценная информация при гидрогеохимическом исследовании часто содержится не в абсолютной концентрации отдельного элемента, а в соотношении элементов с разной подвижностью, которое может указывать непосредственно на источник.

4.4. Гидрогеологические факторы, влияющие на гидрогеохимическое векторирование.

Физически обоснованная интерпретация гидрогеохимических аномалий при поисках ПИ требует тщательного изучения теории систем движения подземных вод, в частности концепции, разработанной Тотом, согласно которой подземные воды являются фундаментальным геологическим фактором, ответственным за массоперенос в иерархии пространственных масштабов. Согласно этой концепции, движение подземных вод происходит в локальных, промежуточных и региональных системах, каждая из которых характеризуется разной длиной пути, гидравлическими градиентами, временем пребывания и степенью геохимической эволюции. Это различие позволяет понять гидрогеологический контекст, необходимый для определения пространственного разрешения и значимости гидрогеохимических аномалий для поисков.

В локальных системах движения грунтовых вод они циркулируют на относительно небольших расстояниях и в течение относительно короткого времени, что позволяет растворенным компонентам оставаться тесно связанными с литологическими породами, из которых они образовались. В таких условиях гидрогеохимические показатели в первую очередь отражают непосредственное взаимодействие воды с горными породами в измененных и минерализованных зонах. Таким образом, термодинамически значимые показатели, такие как индексы насыщенности минералами, состав водных растворов и окислительно-восстановительные условия, могут напрямую указывать на равновесие или близкое к нему состояние с рудными минеральными комплексами. Таким образом, гидрогеохимические аномалии, выявленные в локальных потоках, указывают на скрытую минерализацию с высокой

степенью вероятности и представляют собой непосредственные цели для дальнейших исследований.

Региональные системы движения грунтовых вод, напротив, функционируют на масштабах бассейнов и имеют длительное время пребывания в недрах, в течение которого химический состав грунтовых вод постепенно меняется в результате взаимодействия с различными горными породами, разбавления, смешивания и буферных процессов. Металлы и элементы-индикаторы, высвобождающиеся из минерализованных источников, могут переноситься на расстояние от десятков до сотен километров, прежде чем попадут в понижения рельефа или структурные впадины. Таким образом, гидрогеохимические аномалии, наблюдаемые в таких зонах разгрузки, объединяют геохимические сигналы, поступающие с обширных территорий, и отражают историю длительного переноса, а не пространственную близость к конкретным рудным телам. Региональные аномалии полезны для выявления благоприятных с точки зрения металлогении бассейнов, но они по своей сути имеют низкое пространственное разрешение, что затрудняет прямое обнаружение скрытых месторождений.

Неспособность провести различие между локальными и региональными режимами движения подземных вод часто приводит к неверной интерпретации гидрогеохимических данных, в частности к предположению, что все аномалии в составе подземных вод напрямую указывают на расположение рудных тел. Согласно концепции Тота, эффективность гидрогеохимического векторного анализа в первую очередь зависит от масштаба системы движения подземных вод и времени их пребывания в пласте. Локальные системы позволяют точно определить место залегания полезных ископаемых, а региональные — провести стратегическую оценку разведочных работ в масштабах бассейна. Это различие также объясняет, почему термодинамические показатели сохраняют высокую диагностическую ценность в локальных системах течений, но в региональных условиях все больше зависят от комплексных процессов в бассейнах рек.

Таким образом, в этом обзоре гидрогеохимическая разведка полезных ископаемых рассматривается в рамках механистической модели, объединяющей термодинамическую геохимию с теорией систем движения подземных вод. При этом подземные воды рассматриваются как геологический агент, действующий на разных пространственных уровнях. Эта модель дает последовательное объяснение противоречивым результатам исследований, описанным в научной литературе, и создает прочную концептуальную основу для интерпретации гидрогеохимических данных о минеральных системах, залегающих под толщей осадочных пород и в бассейнах.

4.5. Ключевые геохимические показатели при поисках месторождений

Практическая цель гидрогеохимического исследования — выявить химическую аномалию, то есть изменение химического состава воды, которое отличается от местного фона и указывает на наличие минерализации. Эволюция геохимических индикаторов отражает основную задачу дисциплины: переход от простого обнаружения аномалии к уверенному определению ее источника. Каждый шаг вверх по иерархии индикаторов, от простых элементов к сложным изотопным системам, призван снизить неопределенность интерпретации.

4.5.1. Элементарные проводники и определение геохимических аномалий

Объекты гидрогеохимической разведки можно разделить на две категории: прямые индикаторы (аномальные концентрации самих рудных элементов) и, что встречается чаще, элементы-проводники — сопутствующие элементы, которые часто встречаются в большем количестве, более подвижны в местной среде или легче обнаруживаются, создавая тем самым более обширный и устойчивый химический ореол. Классический пример — использование мышьяка и сурьмы для поиска некоторых типов золотых месторождений. Исследование, проведенное на Сардинии, показало, что в то время как растворенное золото создавало слабую и ограниченную аномалию (~500 м), мышьяк и сурьма присутствовали в гораздо более высоких концентрациях и образовывали более четкую и распространенную структуру, которая указывала непосредственно на золотоносные жилы. Другие индикаторы широкого спектра действия, такие как высокая концентрация сульфатов (SO_4^{2-}) и низкий уровень pH, указывают на более обширную систему минерализации, а не на конкретный металл, что делает их отличными инструментами для региональных исследований.

Формально аномалия определяется как концентрация, статистически значимо превышающая региональный геохимический фон. Важнейший принцип заключается в том, что пороговые значения, определяющие аномалию, полностью зависят от контекста. В нетронутом геологическом массиве на севере Канадского щита фоновый уровень содержания цинка в озерной воде часто составляет менее 2 частей на миллиард (ppb), поэтому любое значение, стабильно превышающее этот уровень, потенциально может считаться аномальным. В то же время в регионах со сложной геологией и развитой промышленностью и сельским хозяйством, таких как Великобритания, аномалии приходится выявлять на фоне гораздо более высокого и изменчивого фона. Такая сложность окружающей среды требует комплексного подхода, чтобы избежать ложных срабатываний. Повышенное содержание одного металла может быть частью литологической сигнатуры или указывать на антропогенное происхождение. Анализируя широкий спектр элементов, геохимики могут выявить эти характерные геохимические

признаки и отличить их от истинных аномалий, связанных с минерализацией, которые часто представляют собой определенный набор элементов.

4.5.2. Индикаторы на основе технологических процессов, объединяющие сигнатуры изменений и термодинамическое моделирование

Осознание того, что простые данные о концентрации могут вводить в заблуждение, привело к разработке более надежных индикаторов, основанных на процессах и отражающих особенности всей минерализующей системы. Эти индикаторы более эффективны, поскольку отражают особенности системы (термодинамическое состояние, ореол измененных пород), что менее двусмысленно, чем концентрация одного элемента. Один из таких подходов — использование индикаторов, связанных с измененными породами, которые отражают химический состав воды, взаимодействующей с обширным ореолом измененных пород вокруг рудного тела. Классический пример — нормализованное отношение магния (Normalized Magnesium, NMg), разработанное для урановых месторождений, связанных с несогласиями, в Австралии. Породы вокруг этих месторождений сильно изменены и обогащены магнием; грунтовые воды, просачивающиеся через эти породы, имеют характерный высокий уровень магния, что является надежным индикатором, который работает даже в местных химических условиях, когда сам уран неподвижен. Второй, более количественный подход предполагает использование индикаторов, полученных с помощью геохимических компьютерных моделей, таких как WATEQ4F или PHREEQC. Самый известный из них — индекс насыщения (ИС), который показывает, насколько образец воды близок к термодинамическому равновесию с конкретным рудным минералом. Положительный ИС означает, что вода перенасыщена и минерал может выпасть в осадок, а отрицательный — что вода недонасыщена и минерал может раствориться. Показатель растворимости является мощным инструментом, поскольку он объединяет влияние рН, окислительно-восстановительного потенциала, температуры и комплексообразования в одно значимое число. Карта показателя растворимости для такого рудного минерала, как уранинит, может дать гораздо более четкое представление о цели геологоразведочных работ, чем карта концентрации урана в руде, поскольку она эффективно корректирует локальные изменения физико-химических условий, влияющих на растворимость.

4.5.3. Усовершенствованные индикаторы, объединяющие изотопные системы и геохимию наночастиц

В последние десятилетия арсенал геологоразведчиков пополнился усовершенствованными методами, которые позволяют получить беспрецедентно подробную информацию об источнике элементов и конкретных процессах, в которых они участвовали, обеспечивая прямую и зачастую однозначную связь с источником. Для определения источника

используются радиогенные изотопы. Например, анализ изотопов свинца позволяет выявить характерную радиогенную сигнатуру ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) грунтовых вод, которые взаимодействовали с урановым месторождением, а изотопы стронция (Sr) ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) можно использовать для отслеживания путей взаимодействия воды с горными породами. Нарушение равновесия уранового ряда дает несколько инструментов для отслеживания процессов. Отношение активностей $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ (UAR) позволяет отличить восстановительные условия вблизи рудного тела от окислительных зон, где руда активно растворяется, а изотопы радия (Ra) ($^{223}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$) могут служить геохимическими часами для определения времени прохождения грунтовых вод от источника, указывая направление к минерализации.

Для отслеживания процесса окисления сульфидов используются традиционные стабильные изотопы, такие как сера ($\delta^{34}\text{S}$) и кислород ($\delta^{18}\text{O}$) в растворенном сульфате. Поскольку гидротермальные сульфидные минералы обычно имеют мантийную сигнатуру серы, этот метод позволяет исследователям отличить истинную сульфатную аномалию, связанную с рудой, от фонового сульфата, поступающего из других источников, таких как морские эвапориты или сельскохозяйственные отходы, как это было продемонстрировано на месторождении Вакильяс. Нетрадиционные стабильные изотопы — это новое перспективное направление, в котором основное внимание уделяется тяжелым металлам, таким как медь ($\delta^{65}\text{Cu}$) и молибден ($\delta^{98}\text{Mo}$). Исследования показали, что окислительно-восстановительные процессы при окислительном выветривании медно-сульфидных минералов приводят к изотопному фракционированию, при котором более тяжелый изотоп ^{65}Cu преимущественно переходит в раствор. Это создает отчетливую положительную аномалию $\delta^{65}\text{Cu}$ в грунтовых водах, которая может служить прямым, специфичным для конкретного процесса вектором, указывающим на рудное тело. Геохимия наночастиц открыла новую парадигму физической дисперсии наряду с химической. Исследования показали, что рудные металлы могут переноситься не только в виде растворённых ионов, но и в виде твёрдофазных наночастиц (например, самородных металлов, сульфидов, таких как Ag_2S), взвешенных в грунтовых водах. Это обеспечивает жизнеспособный механизм переноса элементов с очень низкой растворимостью (таких как Au и Ag) и означает, что аномалия представляет собой физический образец руды и продуктов её выветривания, сохраняющий однозначный источник. Это открывает новые возможности для исследований, таких как анализ нефльтрованной или коллоидной фракции проб воды с использованием передовых методов, таких как одночастичный ICP-MS (spICP-MS). В будущем поисково-разведочные работы с высокими ставками будут во все большей степени зависеть от этих мощных диагностических инструментов для обоснования стоимости и риска бурения.

4.6. Методологии: от полевых данных к целям ГРР

Успешная реализация программы гидрогеохимической разведки зависит от тщательно спланированного рабочего процесса, который включает в себя составление программы исследований, отбор проб, использование соответствующих аналитических методов и сложных стратегий интерпретации данных. Каждый этап должен быть выполнен с высокой точностью, чтобы обеспечить достоверность полученных данных и обоснованность целей разведки.

4.6.1. План исследования, протоколы отбора проб и полевые измерения

Методика гидрогеохимической съемки определяется масштабом разведки, региональными климатическими условиями и местным гидрогеологическим контекстом. Важнейшим первым этапом любой программы является проведение ориентировочных исследований на участке с известными залежами полезных ископаемых. Эта предварительная работа необходима для понимания местных механизмов рассеивания, определения наиболее эффективных элементов поиска, установления ожидаемого масштаба аномалии и проверки протоколов. Можно использовать широкий спектр пробных сред, в том числе воду из ручьев, озер, родников, выходов грунтовых вод и колодцев. Независимо от источника, для обеспечения качества данных крайне важно соблюдать правила отбора проб. Стандартная процедура включает использование чистых пластиковых бутылок, промытых кислотой, фильтрацию на месте через мембрану с размером пор 0,45 мкм для отделения растворенной фракции, а также сохранение аликвот катионов и микроэлементов путем подкисления сверхчистой кислотой для предотвращения их адсорбции на стенках контейнера в соответствии с установленными международными протоколами отбора и анализа проб воды. Для анализа анионов отбирается отдельный образец без добавления кислоты. Не менее важны полевые измерения нестабильных физико-химических параметров, таких как рН, окислительно-восстановительный потенциал (Eh), температура и электропроводность (ЕС), которые могут быстро измениться при контакте образца с атмосферой. Эти параметры необходимо измерять во время отбора проб с помощью калиброванных портативных измерительных приборов. Получение достоверных данных о окислительно-восстановительном потенциале (ОВП) в полевых условиях может быть особенно сложной задачей, поскольку в литературе часто возникает путаница между окислительно-восстановительным потенциалом, измеренным с помощью датчика, и истинными значениями ОВП, приведенными к стандартному водородному электроду (СВЕ). Современные окислительно-восстановительные датчики можно откалибровать с помощью растворов с известным окислительно-восстановительным потенциалом, что позволяет скорректировать влияние температуры и повысить надежность оценки ОВП. Однако загрязнение атмосферным кислородом во время отбора проб остается существенным источником неопределенности.

Чтобы свести к минимуму этот эффект и получить более репрезентативные данные о окислительно-восстановительных условиях *in situ*, рекомендуется использовать скважинные зонды, проточные камеры и закрытые измерительные системы. В некоторых случаях E_h можно косвенно определить по измеренным окислительно-восстановительным парам для интерпретации с высокой степенью достоверности. Важно проводить различие между показаниями окислительно-восстановительного потенциала в полевых условиях (ОВП), полученными с помощью зондовых датчиков, и истинными значениями E_h , привязанными к стандартному водородному электроду (SHE). Измерения ОВП зависят от конкретного прибора и требуют калибровки по окислительно-восстановительным стандартам для получения достоверных оценок E_h . Загрязнение атмосферы кислородом во время отбора проб может еще больше повлиять на результаты окислительно-восстановительных измерений; поэтому рекомендуется использовать проточные ячейки и закрытые измерительные системы для лучшего приближения к условиям окислительно-восстановительных работ в подземных водах *in situ*.

Последние технологические инновации в области отбора проб меняют подход к полевой логистике. Разработка системы отбора проб воды с помощью вертолета на Канадском щите стала новаторским подходом к экономичной съемке в труднодоступных районах. Появление беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), или дронов, стало революционным решением в области отбора проб воды, обеспечивающим повышенную безопасность и значительную экономию средств. Методологические сравнения показали, что усовершенствованные системы с замкнутым контуром и перистальтическим насосом превосходят другие, поскольку способность насоса выполнять фильтрацию точечного источника необходима для получения истинного значения растворенной фракции и обеспечения точного анализа элементов, чувствительных к окислительно-восстановительным процессам.

4.6.2. Передовые аналитические методы и оборудование для гидрогеохимической разведки

Эффективность гидрогеохимии неразрывно связана с развитием аналитических технологий, позволяющих обнаруживать сверхмалые концентрации элементов в воде. Основным методом большинства гидрогеохимических исследований является масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) (табл. 1). Этот метод обеспечивает превосходную чувствительность с обычными пределами обнаружения в диапазоне от частей на миллиард (ppb, или мкг/л^{-1}) до частей на триллион (ppt, или нг/л^{-1}) в сочетании с высокой производительностью и возможностью одновременного анализа более 50 элементов. Такая чувствительность необходима для выявления едва заметных аномалий в содержании критически важных элементов, особенно золота, концентрация которого часто составляет всего

несколько наногаммов на литр. Основным ограничением ICP-MS является его низкая переносимость высокого общего содержания растворенных твердых веществ (TDS), обычно требующая разбавления для образцов с содержанием растворенных твердых веществ более ~ 0,2%. Для анализа вод с высокой минерализацией, таких как рассолы, часто выбирают более надежный ICP-OES из-за его исключительной устойчивости к матрице. Напротив, характеристики ICP-MS быстро ухудшаются в матрицах с высокой соленостью из-за подавления сигнала, загрязнения конуса и увеличения многоатомных помех, что делает ICP-OES предпочтительным методом для рутинного анализа рассола и соленых вод как при гидрогеохимической разведке, так и при оценке ресурсов литиевого рассола.

На переднем крае аналитической науки находятся более специализированные приборы. ИСП-МС с высоким разрешением (High-Resolution ICP-MS, HR-ICP-MS) обеспечивает еще более низкие пределы обнаружения (менее 1000 частей на триллион) и превосходные возможности для устранения проблемных спектральных помех. ИСП-МС с несколькими коллекторами (Multi-Collector ICP-MS, MC-ICP-MS) позволяет с высочайшей точностью измерять соотношение изотопов, что необходимо для нетрадиционной геохимии стабильных изотопов. Для непосредственного анализа индикаторов твердой фазы используются такие методы, как просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) и масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) для наночастиц. Наконец, ионная хроматография (ИХ) остается стандартным методом точного измерения содержания основных анионов, таких как хлорид (Cl⁻) и сульфат (SO₄²⁻), которые необходимы для классификации типов воды и выявления ореолов изменений.

4.6.3. Современные стратегии интерпретации данных

Преобразование необработанных аналитических данных в геологически значимую информацию — критически важный и сложный этап [66,89]. Первым делом необходимо установить геохимический базовый уровень и определить пороговые значения аномалий с учетом контекста. В идеале следует разделить набор данных по геологическому строению коренных пород и определить отдельные пороговые значения для каждой литологии (табл.3).

Геохимические данные по своей сути являются композиционными, то есть переменные представляют собой доли целого, что при неправильной обработке может привести к ложным корреляциям. Современный подход заключается в применении к данным преобразования логарифмических отношений (центрированного логарифмического отношения, \log) перед статистическим анализом, что позволяет получить достоверные результаты.

При правильном преобразовании данных можно использовать целый ряд инструментов для их интерпретации. Термодинамическое моделирование с использованием таких программ,

как PHREEQC, позволяет интерпретировать данные с точки зрения физической химии процессов. Этот подход позволяет оценить, находится ли образец грунтовых вод в равновесии с рудным телом, путем расчета формы нахождения элементов и индекса насыщения (SI) для различных минералов. Это мощный инструмент интерпретации, который менее чувствителен к простым изменениям концентрации.

В дополнение к этой теоретической базе многомерный статистический анализ предлагает основанный на данных подход к изучению сложных гидрогеохимических систем. Такие методы, как анализ главных компонент (АГК) и факторный анализ (ФА), используются для снижения размерности больших многоэлементных наборов данных и выявления основных процессов (выветривания, загрязнения, минерализации), влияющих на химический состав воды. Затем с помощью кластерного анализа в Q-режиме можно сгруппировать отдельные образцы воды в отдельные типы на основе их общей генетической истории, что позволит определить отдельные фоновые и пороговые значения для каждого типа воды и выявить едва заметные признаки минерализации.

В конечном счете геологоразведка — это пространственная наука, а географическая информационная система (ГИС) — важнейшая платформа для завершающего этапа интеграции и визуализации данных. Нанесение гидрогеохимических данных на геологические и топографические карты позволяет напрямую сопоставлять их с известными залежами полезных ископаемых, разломами или конкретными типами горных пород. Истинный потенциал этого подхода раскрывается, когда карты гидрогеохимических аномалий накладываются на другие перспективные слои, такие как зоны изменений, выявленные с помощью дистанционного зондирования, или подземные структуры, обнаруженные с помощью геофизических методов, для выявления областей, где сходятся несколько линий доказательств, что значительно повышает вероятность обнаружения потенциального месторождения. Краткое описание и сравнение современных методов интерпретации гидрогеохимических данных приведены в таблице 3.

4.7. Глобальное применение важнейших и стратегических ПИ

Научные принципы гидрогеохимии были подтверждены успешным применением в самых разных геологических и климатических условиях по всему миру. Приведенные ниже примеры, сгруппированные по типам минеральных систем, показывают, как этот метод применяется на практике, и демонстрируют характерные химические признаки и модели разведки, связанные с различными видами минерализации. Краткое описание глобальных моделей гидрогеохимической разведки также представлено в таблице 2.

4.7.1. Системы из неблагородных металлов

Гидрогеохимические методы особенно хорошо подходят для поиска крупных месторождений цветных металлов, таких как медно-порфировые месторождения, вулканогенные массивные сульфидные месторождения (VMS) и месторождения в осадочных породах, которые при выветривании часто создают сильные и обширные химические аномалии в воде.

Порфировая медь (Cu-Au-Mo)

Исследования месторождений мирового уровня в сверхзасушливой пустыне Атакама в Чили позволили выявить классический гидрогеохимический след с зональным ореолом рассеяния и проксимальной аномалией менее подвижных катионов (Cu, Zn, Co). Он содержит более обширный дистальный шлейф высокоподвижных оксианионов (Mo, Re, As, Se), который можно обнаружить на расстоянии многих километров от источника. На гигантском месторождении скрытой гальки на Аляске исследование продемонстрировало способность ICP-MS с высоким разрешением обнаруживать аномалии сверхнизкого уровня (нг / л) под ледниковым покровом и выявило важнейший принцип рН-зависимого зонирования. Над маломощной, содержащей сульфиды зоной Пиббл-Уэст вода была кислой с аномалией Cu-Cd-Re-сульфатов, в то время как над более глубоко залегающей зоной Пиббл-Ист вода была почти нейтральной, а аномалия определялась элементами, более подвижными в таких условиях (Mo, As, Sb, W). Было доказано, что сочетание нетрадиционных стабильных изотопных составов молибдена и меди ($\delta^{98}\text{Mo}$ и $\delta^{65}\text{Cu}$) является мощным инструментом для идентификации и определения векторов на месторождениях медно-железистых руд (IOCG) в Замбии и осадочных месторождениях меди в Австралии.

В большинстве задокументированных исследований кобальт в целом демонстрирует лишь слабую аномальность, в то время как фтор может служить индикатором минерализованных зон в условиях низкого уровня рН. Молибден обычно является надежным индикатором минерализации, за исключением кислых шлейфов и ручьев, где его концентрация непостоянна. Почти во всех тематических исследованиях мышьяк неизменно выступает в качестве ключевого элемента-индикатора (рис. 3). Рений, который обычно присутствует в молибденитах в следовых количествах и обычно содержится в грунтовых водах в концентрации менее 1 мкг/л, оказался чувствительным индикатором порфировых медно-молибденовых систем как в грунтовых, так и в поверхностных водах. Его потенциал в качестве индикатора был впервые выявлен на медно-молибденовом месторождении Спенс на севере Чили, где было обнаружено выраженное обогащение рением в нисходящем направлении. В некоторых исследованиях аномалии, связанные с рением, обнаруживаются только благодаря очень низким пределам

обнаружения при высокоразрешающем масс-спектрометрическом анализе с индуктивно-связанной плазмой. Это позволяет предположить, что рений может играть более важную роль, чем считалось ранее.

На месторождении Спенс на подвижность металлов сильно влияют колебания солености и доступность лигандов. Повышенная соленость возникает из-за растворения погребенных горизонтов эвапоритов, остатков древних солончаков, циркулирующими грунтовыми водами. Эти «вторичные рассолы» могут подниматься в более мелкие водоносные горизонты по структурным каналам, особенно во время сейсмических событий. Локальное смешение этих глубинных рассолов с пониженным содержанием кислорода и более окисленных приповерхностных вод приводит к экстремально высокой солености, при которой общее содержание растворенных твердых веществ обычно превышает 25 000 мг/л (по сравнению с ~2500 мг/л выше по течению от месторождения), и создает резкий окислительно-восстановительный переход [3,61]. В результате этого процесса вблизи минерализованной системы образуется кислотный геохимический след с показателем pH до 4,73, концентрацией меди обычно порядка 1000 мкг/л (локально достигающей 28 991 мкг/л) и концентрацией молибдена, часто превышающей 100 мкг/л. Грунтовые воды в Спенсе достигают состояния равновесия или перенасыщения по отношению к нескольким вторичным минералам меди, включая атакамит, малахит, азурит, брошантит, антилерит и халькантит.

Вулканогенные массивные сульфидные месторождения (VMS)

Фундаментальная работа в ландшафте вечной мерзлоты северного Канадского щита продемонстрировала эффективность отбора проб озерной воды в нетронутой среде с исключительно низкими фоновыми концентрациями металлов (<2 частей на миллион). Было установлено, что цинк (Zn) является лучшим проводником по сравнению с Cu из-за его большей химической подвижности в поверхностных водах, как правило, от кислых до нейтральных. При разведке в зеленокаменном поясе Абитибби приходится сталкиваться с проблемой глубоких соленых грунтовых вод, которые могут маскировать признаки минерализации. Для выявления едва заметных, но характерных аномалий, связанных с изменениями, требуется сложное моделирование, позволяющее скорректировать влияние засоления.

Гидротермально-осадочные (SEDEX/MVT) (Pb-Zn)

Пилотное исследование в Северном Уэльсе выявило сложности, связанные с геологоразведкой на застроенных территориях, и продемонстрировало абсолютную необходимость комплексного, многокомпонентного подхода для разделения перекрывающихся сигналов, связанных с геологией коренных пород, минерализацией и антропогенным воздействием. В системах с нейтральным уровнем pH и карбонатным буфером

в Индии и Австралии, где подвижность металлов ограничена, требуются более сложные методы, такие как приведение рудообразующих элементов к стабильному элементу, например хлориду (например, расчет молярных соотношений Zn/Cl^- и SO_4^{2-}/Cl^-) или использование высокорadioгенных изотопов свинца для определения перспективных участков под покровом.

4.7.2. Системы драгоценных металлов

Изучение драгоценных металлов с помощью гидрогеохимических методов представляет собой сложную аналитическую задачу из-за их крайне низкой растворимости и подвижности, но современные методы сверхмалых концентраций сделали этот метод вполне применимым.

Эпидермальное золото-серебро (Au-Ag)

Были разработаны две основные модели геологоразведки. В засушливых районах с высоким содержанием солей, таких как Большой Бассейн в США, при исследовании месторождения Слиппер была применена классическая модель, согласно которой золото и серебро переносятся в виде стабильных растворимых хлоридных комплексов ($AuCl_2^-$ и $AgCl_2^-$). При разбавлении серебро выпадает в осадок, образуя широкий заметный ореол в неглубоких грунтовых водах, который служит мощным индикатором скрытых эпидермальных месторождений. В то же время исследование эпидермальной системы в окислительных, почти нейтральных пресных водах Сардинии показало, что подвижность растворенного золота очень ограничена, что приводит к возникновению едва заметной аномалии на глубине всего около 500 м. В таких условиях гидрогеохимию лучше всего использовать для поиска перспективных участков, ориентируясь на более устойчивые и распространенные элементы-маркеры, такие как мышьяк и сурьма.

Золото (Au) орогенного и карлинского типов

Гидрогеохимические исследования глубоко выветренного кратона Йилгарн в Австралии показали, что, хотя растворенное золото может быть эффективным индикатором, при разведке месторождений чаще используются другие индикаторы, в частности мышьяк, сурьма, теллур и вольфрам, которые образуют более обширные ореолы, чем само золото. При поиске золотых месторождений типа Карлин в Неваде, где подвижность золота в карбонатных породах очень ограничена, геологоразведка основывается на обнаружении высокоподвижных индикаторных элементов: мышьяка, сурьмы, ртути и таллия.

Орогенные (мезотермальные) золотоносные системы также стали предметом тщательных гидрогеохимических исследований в Австралии, особенно на кратоне Йилгарн. Эти исследования легли в основу нескольких проектов по гидрогеохимическому картированию континента. Из-за засушливого климата Австралии гидрогеохимическая разведка в основном проводится в подземных средах с большим количеством грунтовых вод. Физико-химическая

изменчивость типов грунтовых вод оказывает решающее влияние на растворимость, перенос и стабильность золота и сопутствующих элементов.

Исследования, проведенные в районах известных минерализованных систем на кратоне Йилгарн, обычно выявляют резкие геохимические контрасты по сравнению с региональным фоном, составляющим около 3 нг/л золота. На месторождении Каросуэ в насыщенных кислородом и кислых грунтовых водах содержится до 2 мкг/л золота, а концентрация вблизи золотоносных участков в районе Блэк-Флэг достигает примерно 7 нг/л. В системе Сент-Айвс кислые рассолы, взаимодействующие с золотоносными породами, создают выраженные аномалии золота с концентрацией до 52 нг/л, хотя эти аномалии имеют ограниченную пространственную протяженность и слабо связаны с распространенными индикаторами, такими как сурьма, висмут и теллур. В работе такое поведение объясняется адсорбцией на аморфных (окси)гидроксидах железа, вызванной переходом золота из формы $AuCl_3$ в смешанные хлоргидроксидные комплексы при повышении рН с 4 до 7 (рис. 4).

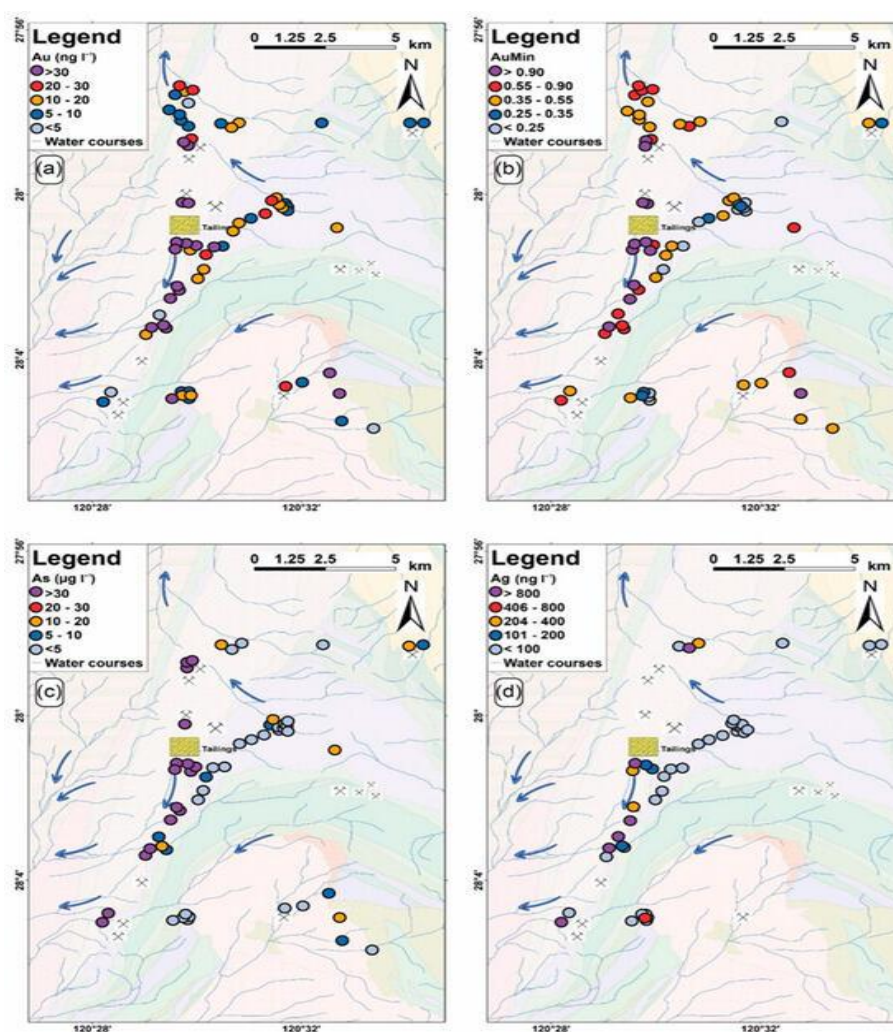


Рис. 4. Карты пространственного распределения золотого рудника Агню, иллюстрирующие концентрацию (a) Au, (b) AuMin, (c) As и (d) Ag. Интерпретированные направления движения грунтовых вод показаны синими стрелками, действующие шахты — символами, желтый многоугольник обозначает границы хвостохранилища

Как и в случае с другими типами месторождений золота, при выщелачивании минерализованных зон может высвободиться широкий спектр индикаторов, способных образовывать обширные гидрогеохимические ореолы. На месторождении Агню были зафиксированы повышенные концентрации растворенных Au, Ag, As, W, Co и Mn, которые соответствуют основным компонентам золотоносной системы. Эти аномалии обычно превышают региональный фоновый уровень на два-пять порядков, а некоторые значения являются самыми высокими из зафиксированных в северной части региона Йилгарн. Схожие многоэлементные сигнатуры наблюдаются на месторождении Хармони, где были зафиксированы аномалии Mo, W и Rb, а обогащение Au тесно связано с зонами гидротермальных изменений. В районе Блэк-Флэг такие индикаторы, как As, Mo и Sb, встречаются вместе с залежами Au. В то же время в Южной Австралии Ag и As распределены неравномерно и лишь изредка образуют аномалии вблизи месторождений Au. В подземных водах вблизи месторождения Тункилла наблюдается повышенное содержание золота, а также аномалии ванадия и теллура.

4.7.3. Критически важные минеральные системы

Гидрогеохимия играет все более важную роль в поиске критически важных минералов, необходимых для перехода к «зеленой» энергетике и развития высокотехнологичных отраслей.

Уран (U)

Модель разведки месторождений с фронтальным залеганием в песчаниках в основном сводится к поиску подвижного окислительно-восстановительного барьера, на котором уран выщелачивается окисляющими грунтовыми водами и осаждается на восстановительном барьере. В этом случае эффективным оказалось термодинамическое моделирование: карты расчетного индекса насыщения (SI) уранинита точно очерчивают рудные тела там, где карты содержания растворенного урана оказались неэффективными. Для поиска глубоко залегающих месторождений, связанных с несогласиями, требуется комплексный подход с использованием сочетания прямых уран-изотопных аномалий, мобильных индикаторов (Ra, Rn, He, As), усовершенствованных изотопных индикаторов (высокое соотношение $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) и химических маркеров окружающего ореола изменений (нормализованное отношение магния).

Литий (Li)

Роль гидрогеохимии существенно различается в зависимости от типа месторождения. Для месторождений литиевых рассолов в засушливых закрытых тектонических бассейнах, таких как Андский литиевый треугольник, гидрогеохимия является основным методом оценки ресурсов, поскольку рудой являются сами обогащенные литием соленые грунтовые воды. В ходе ГРП проводится непосредственный анализ рассолов на предмет экономической

концентрации лития и ключевых показателей экономической целесообразности, в частности низкого соотношения магния и лития (Mg/Li). При поиске пегматитов Li-Cs-Ta (LCT) в твердых породах основное внимание уделяется литогеохимии (например, соотношению K и Rb в породе), но гидрогеохимия позволяет обнаружить дисперсионные ореолы Li, Rb и Cs в неглубоких грунтовых водах из связанных с ними зон изменения.

Редкоземельные элементы (РЗЭ)

Гидрогеохимическая разведка на редкоземельные элементы — это относительно новое направление, основанное на интерпретации уникального химического поведения лантаноидов. При разведке основное внимание уделяется не абсолютной концентрации одного элемента, а распределению всей группы редкоземельных элементов в сравнении с таким эталоном, как хондрит. Эти данные позволяют получить четкое представление об истории взаимодействия воды с окружающей средой. К ключевым диагностическим признакам относятся степень фракционирования легких редкоземельных элементов (ЛРЗЭ) и тяжелых редкоземельных элементов (ТРЗЭ), а также наличие специфических аномалий содержания отдельных элементов (например, Eu, Ce), которые могут указывать на источник, например карбонатит.

4.8. Обобщение тенденций, проблем и перспективных направлений

В отличие от описательных обзоров, основанных на экспертном отборе и тематическом акцентировании, подход, основанный на методе PRISMA, позволяет количественно оценить тенденции, согласованность и пробелы в мировой научной литературе. Систематический анализ аналитических методов, гидрогеохимических индикаторов и интерпретационных концепций позволяет выявить не только доминирующие практики, но и недостаточно представленные подходы и новые методы. Это различие крайне важно для объективной оценки методологической зрелости и определения приоритетов будущих исследований.

Эволюция гидрогеохимии демонстрирует четкую тенденцию к появлению более сложных, комплексных и прогностических методологий. Этот обзор также позволяет выделить ряд нерешенных проблем, которые по-прежнему влияют на исследования и практику, но в то же время открывают значительные перспективы для развития этой дисциплины. Основная проблема превратилась из вопроса о том, можно ли измерить едва заметную аномалию, в вопрос о ее достоверной идентификации и однозначном определении того, что означают полученные результаты.

4.8.1. Новые тенденции в области интеграции данных, прогнозного моделирования и технологических инноваций

Среди наиболее значимых новых тенденций, выявленных в ходе этого систематического обзора, - растущее применение нетрадиционного фракционирования стабильных изотопов

(например, $\delta^{65}\text{Cu}$, $\delta^{98}\text{Mo}$) и геохимии наночастиц с использованием spICP-MS, которые обеспечивают специфические для процесса и источника диагностические сигналы, недоступные при обычном анализе растворенной фазы.

Доминирующей тенденцией является переход от упрощенного поиска аномалий по отдельным элементам к комплексным подходам к геологоразведке. Ранний призыв объединить данные о химическом составе воды с геологическими картами, геохимическими данными о донных отложениях в водоемах и снимками дистанционного зондирования на платформе ГИС был дальновидным шагом на пути к многоуровневому подходу, основанному на данных, который сегодня является фундаментальным для современной геологоразведки. Такой комплексный подход позволяет более надежно подтверждать наличие месторождений, поскольку аномалии могут быть подтверждены несколькими независимыми источниками данных.

В то же время эта дисциплина стала в большей степени опираться на данные и прогнозирование. Эта тенденция резко ускорилась с развитием искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО). Такие алгоритмы, как «случайный лес» и нейронные сети, могут анализировать огромные многопараметрические массивы данных, чтобы выявлять едва заметные нелинейные закономерности, которые часто указывают на геохимические аномалии. На их основе создаются количественные карты перспективности, которые представляют собой прорыв в области традиционного обнаружения аномалий.

Эта эволюция стала возможной благодаря новым достижениям в области технологий отслеживания и отбора проб. Разработка и применение современных индикаторов, в частности нетрадиционных стабильных изотопов и наночастиц, позволяют получать беспрецедентно точную информацию о процессах, что снижает вероятность ошибок. В то же время новые платформы для отбора проб, такие как беспилотные летательные аппараты, и разработка полевых датчиков для мониторинга в режиме реального времени коренным образом меняют процесс сбора данных. Переход к непрерывному мониторингу позволяет перейти от одномоментной съемки к созданию «фильма» о гидрогеохимической системе, включающего четвертое измерение — время, — и выявлять мощные, но быстротечные аномалии, которые не были бы обнаружены при использовании традиционных методов.

4.8.2. Нерешенные проблемы гидрогеохимических поисков

Несмотря на свои успехи, гидрогеохимия сталкивается с рядом проблем. Главная из них — сезонная и временная изменчивость. Например, весеннее таяние снега может кардинально изменить химический состав воды, разбавляя, концентрируя или физически перемещая аномалии из их источников. Такая временная нестабильность требует соблюдения строгих

правил отбора проб, таких как сбор всех проб в течение короткого промежутка времени при стабильном низком уровне потока, чтобы обеспечить сопоставимость данных. Технические и логистические проблемы, такие как постоянный риск загрязнения на сверхмалых уровнях и сложность получения репрезентативных образцов из глубинных пород с трещинами, также остаются серьезными препятствиями. Фоновые концентрации во многих нетронутых средах часто находятся на уровне нескольких частей на миллиард или менее, поэтому даже незначительное загрязнение от контейнеров для образцов, консервантов или при транспортировке может привести к ложным аномалиям.

Пожалуй, самой сложной и трудноразрешимой задачей является достоверная интерпретация аномалий на сложном и крайне изменчивом геохимическом фоне. Чтобы отделить едва заметные аномалии, связанные с минерализацией, от ярко выраженных химических признаков различных типов горных пород, промышленного загрязнения или сельскохозяйственных стоков, требуется сложный статистический анализ и глубокое понимание всех потенциальных источников в пределах водосборного бассейна. Отличие истинной аномалии, связанной с минерализацией, от «ложной» аномалии, вызванной другими процессами, остается одной из основных задач гидрогеохимической интерпретации и является причиной внедрения более совершенных инструментов интерпретации.

4.8.3. Процесс гидрогеохимических исследований

Рабочий процесс, представленный на рисунке 5, представляет собой структурированную схему применения гидрогеохимии при поисках рудных месторождений. Он иллюстрирует последовательный переход от определения целей отбора проб к заключительным этапам интерпретации данных и составления отчетов, обеспечивая научную обоснованность и практическую надежность каждого этапа. Процесс начинается с определения целей отбора проб, которые зависят от того, для чего проводится исследование: для определения геохимических базовых показателей, выявления признаков минерализации или гидрогеохимических аномалий. Эти цели определяют последующие решения по выбору участка и предсъёмочным проверкам, включая гидрогеологическое картирование, оценку доступности и безопасности, калибровку оборудования и GPS-мониторинг. Такие подготовительные этапы крайне важны для обеспечения качества данных и эффективности полевых работ.

Сбор и обработка проб являются ключевыми этапами рабочего процесса. Грунтовые воды обычно собирают с помощью черпаков или насосов (перистальтических, мембранных, инерционных или погружных), а воду из ручьев — с помощью шприцев. Для разделения растворенных веществ и твердых частиц используются методы фильтрации, бумажные

фильтры, картриджи или проточные системы. Тщательная маркировка проб и регистрация метаданных (идентификатор, координаты, время/дата, глубина скважины или уровень воды в ручье, название коллектора) обеспечивают прослеживаемость и воспроизводимость результатов (рис. 5).

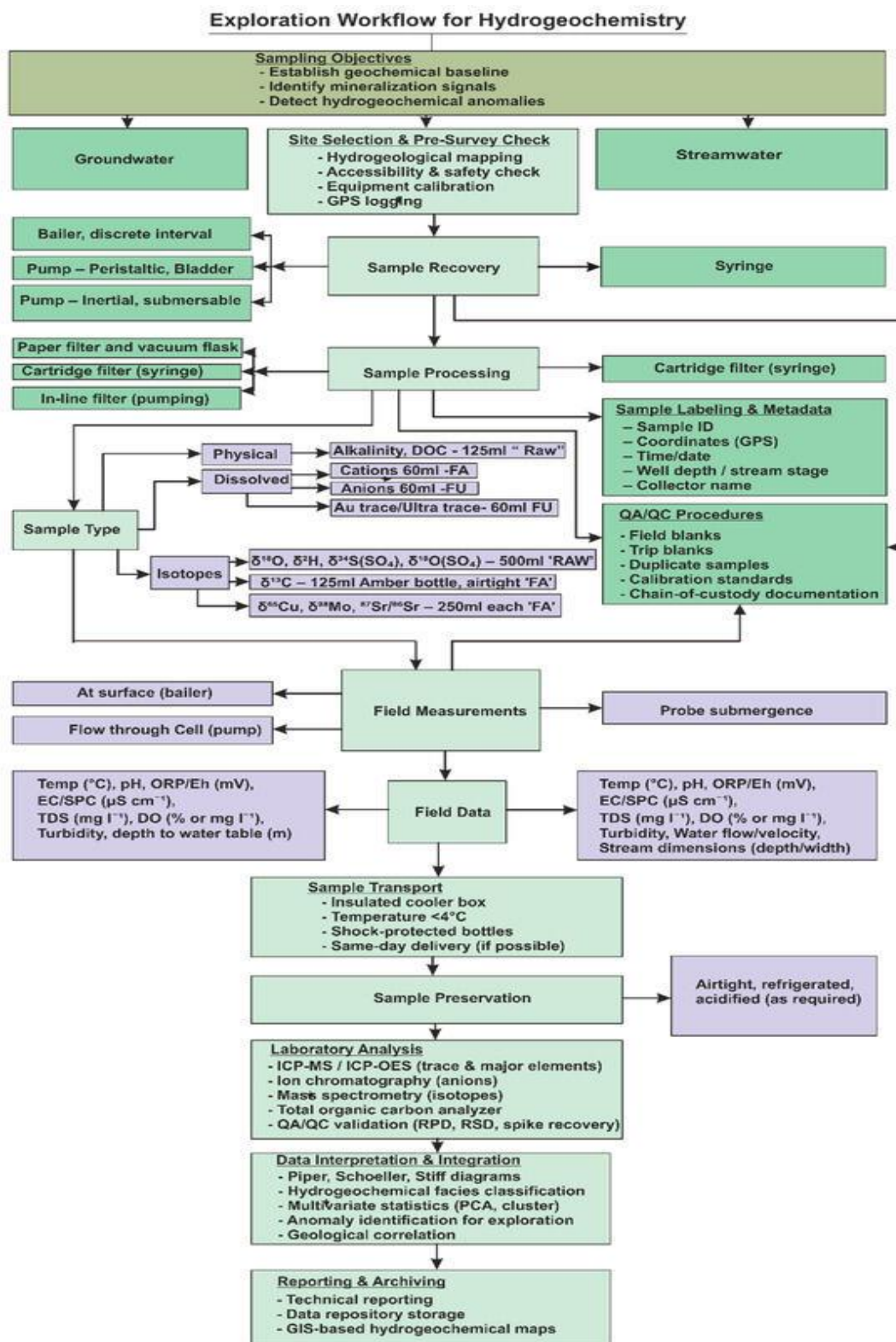


Рис. 5. Система гидрогеохимических поисков рудных месторождений.

Для обеспечения аналитической достоверности рабочий процесс включает в себя процедуры контроля качества, в том числе полевые и лабораторные холостые пробы, дубликаты, калибровочные стандарты и документацию по хранению и передаче образцов. Образцы делятся на физические, растворенные и изотопные, при этом для каждого анализируемого показателя требуются определенные объемы и условия хранения. Например, для $\delta^{13}\text{C}$ нужны герметичные флаконы из янтарного стекла, а для таких изотопов, как $\delta^{65}\text{Cu}$, $\delta^{98}\text{Mo}$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, — точные объемы и хранение в кислой среде.

Полевые измерения и сбор данных проводятся на месте с помощью пробоотборников, проточных кювет или погружных датчиков. Такие параметры, как температура, pH, окислительно-восстановительный потенциал (Eh), электропроводность, общее содержание растворенных твердых веществ, растворенный кислород, мутность и гидрологические показатели (глубина залегания грунтовых вод, скорость течения, размеры русла), предоставляют важную контекстную информацию для интерпретации химических аномалий.

В рабочем процессе особое внимание уделяется транспортировке и хранению образцов, для чего требуются изолированные холодильники, контроль температуры ($<4^\circ\text{C}$), бутылки с защитой от ударов и, по возможности, доставка в тот же день. Стратегии консервирования, герметичная укупорка, охлаждение и подкисление применяются по мере необходимости для сохранения целостности образца до проведения лабораторного анализа.

В лаборатории используются передовые методы, такие как масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой и атомно-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (для определения микроэлементов и основных элементов), ионная хроматография (для анионов), масс-спектрометрия изотопных отношений и анализ общего органического углерода. Показатели контроля качества, в том числе относительная процентная разница, относительное стандартное отклонение и коэффициент извлечения, обеспечивают надежность анализа.

Заключительные этапы рабочего процесса сосредоточены на интерпретации и интеграции данных. Гидрохимические фации классифицируются с использованием диаграмм Пайпера, Шеллера и Стиффа, которые подходят для характеристики типов подземных вод и доминирующих тенденций геохимической эволюции, имеющих отношение к разведке полезных ископаемых, в то время как многомерные статистические подходы (PCA, кластеризация) применяются к наборам данных с логарифмическим преобразованием. Эти методы облегчают идентификацию аномалий и геологическую корреляцию. Затем результаты обобщаются в технические отчеты и гидрогеохимические карты на основе ГИС, обеспечивая архивирование результатов и их доступность для долгосрочного планирования геологоразведочных работ.

4.8.4. Перспективы и приоритетные направления будущих исследований.

Фундаментальные исследования и новые тенденции указывают на несколько ключевых возможностей для развития этой области. Наиболее перспективным направлением является углубление междисциплинарной интеграции. Следующим шагом станет переход от простого наложения двумерных карт к включению гидрогеохимических данных в динамические трехмерные и четырехмерные модели геологических систем, а также сочетание гидрохимии с глубинными геофизическими методами для отслеживания путей движения флюидов от крупномасштабных структур земной коры к поверхности. Кроме того, существует очевидная возможность расширения геохимического инструментария. По мере роста спроса на критически важные минералы необходимы исследования для определения надежных гидрогеохимических индикаторов и изотопных систем для малоизученных полезных ископаемых, таких как кобальт, индий и галлий. Решающее значение будет иметь дальнейшая разработка и проверка нетрадиционных систем стабильных изотопов и методов анализа наночастиц для различных типов месторождений.

Ускоренное внедрение новых технологий будет иметь решающее значение. Геологоразведочная отрасль должна продолжать использовать возможности искусственного интеллекта (ИИ) и машинного обучения (МО) не только для анализа данных после проведения изысканий, но и для разработки стратегии разведки в режиме реального времени. Для реализации этих подходов, требующих больших объемов данных, необходимо расширять международное сотрудничество и инициативы по обмену данными. Создание всеобъемлющих, стандартизированных и общедоступных геохимических баз данных имеет решающее значение для формирования надежных глобальных базовых показателей и обучения мощных моделей искусственного интеллекта, которые станут основой для открытия месторождений полезных ископаемых следующего поколения. Это в корне меняет набор навыков, необходимых геохимику-разведчику. Сегодня в число основных компетенций должны входить наука о данных, многомерная статистика, изотопная геохимия и комплексное трехмерное мышление.

Доказательная база имеет ряд ограничений, в том числе различия в плотности отбора проб, аналитических методах и стандартах отчетности в разных исследованиях. В некоторых случаях неполные метаданные или ограниченная документация по контролю качества не позволяют в полной мере оценить достоверность данных. Кроме того, географическая предвзятость в пользу хорошо изученных регионов может ограничивать применимость полученных результатов к малоизученным территориям.

5. Выводы.

В систематическом обзоре, выполненном в соответствии со стандартом PRISMA-2020, были обобщены данные 118 эмпирически проверенных исследований, опубликованных в период с 1946 по 2025 год. Обзор представляет собой структурированную оценку гидрогеохимических методов, используемых при разведке полезных ископаемых в различных геологических, гидрогеологических и климатических условиях. Систематический обзор показывает, что гидрогеохимия наиболее эффективна, когда используется как инструмент разведки, основанный на процессах, а не как простой метод обнаружения аномалий по концентрации.

В ходе рассмотренных исследований были выявлены устойчивые эмпирические закономерности, в том числе формирование зональных ореолов водной дисперсии, предсказуемое распределение подвижных и неподвижных элементов, а также сильная зависимость проявления аномалий от режима движения грунтовых вод, окислительно-восстановительного состояния, рН и доступности лигандов. Эти результаты, неоднократно подтвержденные на примере систем с неблагородными, драгоценными металлами, важнейшими минералами и редкоземельными элементами, доказывают, что гидрогеохимические аномалии отражают комплексные процессы минерализации, а не отдельные геохимические сигналы.

Систематическое сравнение методологий показывает явную тенденцию к термодинамически обоснованной интерпретации, многомерному анализу композиционных данных и тщательному изучению систем движения грунтовых вод. Исследования, в которых использовались индексы насыщенности минералами, соотношения, связанные с изменениями, изотопные индикаторы и контекст системы движения грунтовых вод, неизменно давали более достоверные результаты, чем те, в которых использовались только пороговые значения для отдельных элементов. Новые подходы, выявленные в ходе анализа литературы, в том числе нетрадиционное фракционирование стабильных изотопов и геохимия наночастиц с использованием метода изотопного разбавления и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, обеспечивают более точную идентификацию источника и представляют собой значительный методологический прорыв, подкрепленный растущей эмпирической базой.

Ключевым вкладом этого обзора является формализация стандартизированного, воспроизводимого процесса геологоразведочных работ, основанного на практиках, которые чаще всего упоминаются в отобранных исследованиях. Благодаря четкой взаимосвязи между планированием исследований, протоколами отбора проб, аналитическими стратегиями и

интерпретацией данных в рамках единой системы этот обзор выходит за рамки описательных обзоров и представляет собой научно обоснованную основу для воспроизводимых гидрогеохимических исследований.

В совокупности систематические данные подтверждают, что гидрогеохимия — это масштабируемый, малозатратный и научно обоснованный подход к разведке скрытых минеральных систем. При использовании процессно-ориентированной интерпретации и современных аналитических инструментов гидрогеохимия позволяет получать достоверную информацию о векторах, которая дополняет геофизические и геологические данные, способствуя эффективной и устойчивой разведке полезных ископаемых в условиях растущего покрова.

В будущих исследованиях следует уделить приоритетное внимание количественному сопоставлению новых изотопных индикаторов и индикаторов на основе наночастиц для различных типов месторождений, более тщательной проверке в недостаточно изученных климатических регионах и интеграции гидрогеохимических данных в динамические трехмерные и четырехмерные модели перспективности. Эти направления напрямую вытекают из пробелов, выявленных в ходе систематического анализа, а не из концептуальной экстраполяции.

ИСТОЧНИК:

Joseph Ndago Amoldago and Emmanuel Daanoba Sunkari. «APPLICATION OF HYDROGEOCHEMISTRY IN MINERAL EXPLORATION: A SYSTEMATIC REVIEW OF GLOBAL PRACTICES, EMERGING TRENDS, AND FUTURE DIRECTIONS». Minerals 2026, 16.