



ФГБУ «ВИМС»

ЗАРУБЕЖНЫЕ ИНТЕРНЕТ-МАТЕРИАЛЫ

**ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И ДР. ТЕХНОЛОГИИ,
МЕТОДЫ И МЕТОДИКИ
ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ И ПОИСКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
(преимущественно «скрытого» типа)**

№ 13

Редактор-составитель: В.В. Коротков

СОДЕРЖАНИЕ:

	стр.
I. МОНИТОРИНГ ТЕНДЕНЦИЙ МИРОВОГО МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА В 2024 ГОДУ.....	5
1. Топ-50 крупнейших горнодобывающих компаний Мира.....	5
2. Обзор компаний США: разведка месторождений меди, золота, редкоземельных металлов и др.....	11
3. Завершенные проекты ГРР за рубежом.....	17
II. ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЕ СКАНИРОВАНИЕ КЕРНА ПРИ КАРТИРОВАНИИ ЛИНЕЙНЫХ ПОИСКОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОРФИРОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ.....	20
1. Введение.....	20
2. Испытательный полигон.....	22
3. Сбор данных.....	23
3.1. Гиперспектральное сканирование керна.....	24
3.2. SEM-MLA.....	24
4. Методы.....	26
4.1. Картирование рудной минерализации.....	26
4.2. Выделение жил.....	27
5. Результаты.....	29
5.1. Данные проверки.....	29
5.2. Рудная минерализация.....	30
5.3. Выявление структурных особенностей.....	32
6. Проверка результатов.....	35
7. Обсуждение.....	38
8. Выводы.....	40
III. ГЕОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОЧВЫ ПРИ ПОИСКАХ «СКРЫТОГО» ОРУДЕНЕНИЯ (<i>Северный Китай</i>).....	42
1. Введение.....	42
2. Материалы и методы.....	42
2.1. Геологические условия.....	42
2.2. Отбор проб и анализ.....	43
3. Результаты.....	45
3.1. Исследования м-ния Хуаньюшань.....	45
3.2. Исследования м-ния Чжунсуйцзихуа.....	47
3.3. Исследования м-ния Цюцзя.....	49
4. Обсуждение.....	50
5. Выводы.....	54
IV. ОСНОВЫ ФИТОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ СКРЫТОГО ОРУДЕНЕНИЯ (<i>Центрально Африканский медно-кобальтовый пояс</i>).....	56
1. Введение.....	56
2. Методология.....	57
3. Пространственные тенденции геологического и геохимического воздействия на характеристики и распространение видов растений.....	60
3.1. Геологические условия ЦАМП.....	60
3.2. Фитогеографическая характеристика ЦАМП.....	61
3.3. Минерализация и геохимия микроэлементов.....	62

3.4. Геохимический контроль поведения металлов в системах наземных растений.....	64
3.5. Геохимия растительности и ее использование в качестве среды для отбора проб.....	67
4. Методы оценки использования растений для выявления месторождений.....	70
4.1. Металлофиты ЦАМП.....	72
4.2. Комплексные подходы к исследованию фитогеохимии.....	73
5. Проблемы и возможности применения фитогеохимии.....	75
6. Выводы и направления будущих исследований.....	77
V. ФИТОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ СКРЫТОГО W-Sn	
ОРУДЕНЕНИЯ (рудный район Шичжюань, провинция Хунань, Китай)....	80
1. Введение.....	80
2. Материалы и методы.....	81
2.1. Описание района исследований.....	81
2.2. Сбор, подготовка и анализ проб.....	82
2.3. Контроль и оценка качества, анализ данных.....	83
3. Результаты.....	84
3.1. Характеристики микроэлементов в растениях.....	84
3.2. Многомерный статистический анализ.....	89
4. Обсуждение.....	92
4.1. Факторы, влияющие на содержание микроэлементов в растениях.....	92
4.2. Проверка результатов на основе известного оруденения и геологических данных.....	93
4.3. Ограничения и перспективы на будущее.....	93
5. Выводы.....	94
VI. ИНТЕГРАЦИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ И МАГНИТНЫХ ДАННЫХ ПРИ ПРОГНОЗНО-МИНЕРАГЕНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ (район Дуньян, Фуцзянь, Китай).....	
1. Введение.....	95
2. Геологические условия.....	95
3. Методология.....	97
3.1. Региональная гравитация.....	97
3.2. Региональное магнитное поле.....	98
4. Результаты и обсуждение.....	100
4.1. Анализ регионального гравитационного поля.....	100
4.2. Анализ регионального магнитного поля.....	101
4.3. Интерпретация разломов.....	103
4.4. Перспективные поисковые площади.....	105
5. Выводы.....	106
VII. 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ СКРЫТОГО СКАРНОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ (район Сюаньчэн–Магушань, Китай).....	
1. Введение.....	107
2. Методы.....	108
2.1. 3D-моделирование перспективности.....	108
2.2. Алгоритм логистической регрессии.....	109

2.3. Алгоритм случайного леса.....	109
3. Район исследования и данные.....	109
3.1. Геологические предпосылки.....	110
3.2. База данных.....	110
3.3. Результаты 3D моделирования перспективности.....	111
4. Процесс и результаты моделирования перспективности.....	112
4.1. Построение прогнозной модели.....	113
4.2. Анализ эффективности модели.....	113
5. Обсуждение.....	114
6. Выводы.....	116
	118
VIII. 3D-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ПРОГНОЗЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА КАМАСТСКОГО ТИПА (<i>Восточно- Джунгарский бассейн, С-З Китая</i>).....	119
1. Введение.....	119
2. Геологические условия исследуемой территории.....	120
3. Ключевые рудолокализирующие факторы и поисковая модель.....	121
4. Обработка данных и процесс 3D-моделирования.....	123
5. Результаты 3D моделирования урановорудного района Камуст.....	126
6. Прогнозирование уранового оруденения.....	129
7. Выводы.....	138
<i>ИСТОЧНИКИ</i>	139

I. МОНИТОРИНГ ТЕНДЕНЦИЙ МИРОВОГО МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА В 2024 ГОДУ [3, 4].

1. Топ-50 крупнейших горнодобывающих компаний Мира (рис. 1).

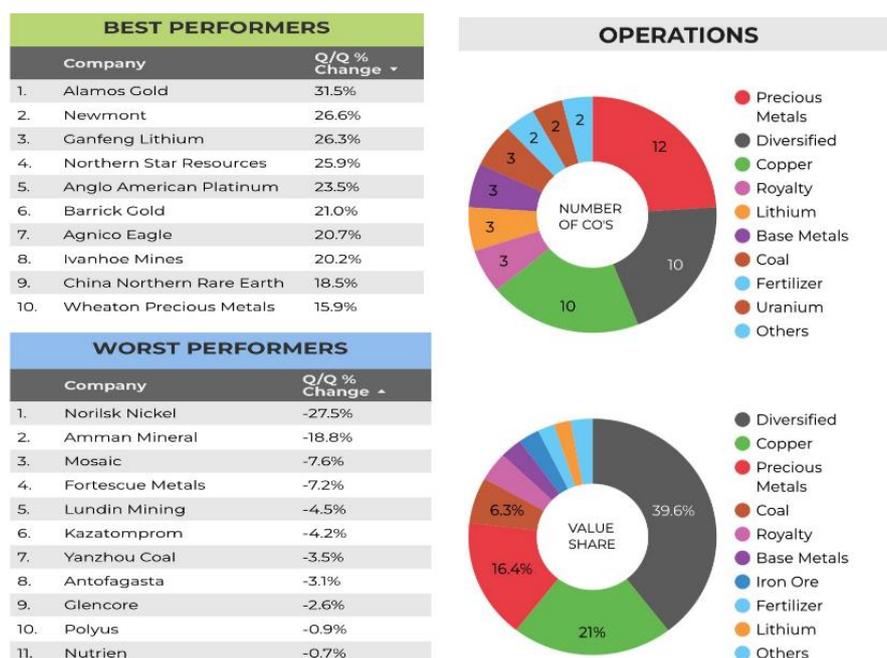
	Company	Symbol	Country	HQ	Operations	Market Value End-Q3 ▾	Q/Q % Change
1.	BHP Group	ASX:BHP	Australia	Melbourne	Diversified	153.8B	5.2%
2.	Rio Tinto	ASX:RIO	Australia	Melbourne	Diversified	118.3B	5.0%
3.	Southern Copper	NYSE:SCCO	Mexico	Mexico City	Copper	92.7B	10.1%
4.	Freeport-McMoRan	NYSE:FCX	US	Phoenix	Copper	72.6B	4.0%
5.	Glencore	LON:GLEN	Switzerland	Baar	Diversified	69.1B	-2.6%
6.	Zijin Mining	SHSE:601899	China	Xiamen	Diversified	66.9B	4.5%
7.	Newmont	NYSE:NEM	US	Denver	Precious Metals	61.1B	26.6%
8.	Vale	BOVESPA:VALE3	Brazil	Rio de Janeiro	Diversified	48.9B	2.7%
9.	Ma'aden	TADAWUL:1211	Saudi Arabia	Riyadh	Diversified	47.7B	14.2%
10.	Amman Mineral	IDX:AMMAN	Indonesia	Jakarta	Copper	41.6B	-18.8%
11.	Fortescue Metals	ASX:FMG	Australia	Perth	Iron Ore	41.3B	-7.2%
12.	Agnico Eagle	TSE:AEM	Canada	Toronto	Precious Metals	39.4B	20.7%
13.	Anglo American	LON:AAL	UK	London	Diversified	38.7B	3.7%
14.	Shaanxi Coal	SHA:601225	China	Xi'an	Coal	38.1B	6.3%
15.	Coal India	BOM:533278	India	Kolkata	Coal	36.5B	4.0%
16.	Barrick Gold	TSE:ABX	Canada	Toronto	Precious Metals	35.2B	21.0%
17.	Wheaton Precious Metals	TSE:WPM	Canada	Vancouver	Royalty	27.4B	15.9%
18.	Teck Resources	TSE:TECK.B	Canada	Vancouver	Diversified	26.7B	7.6%
19.	CMOC Group	HKG:3993	China	Luoyang City	Copper	25.6B	6.6%
20.	Antofagasta	LON:ANTO	UK	London	Copper	25.5B	-3.1%
21.	Nutrien	TSE:NTR	Canada	Saskatoon	Fertilizer	24.7B	-0.7%
22.	Vedanta	BOM:500295	India	Panaji	Base Metals	23.6B	14.3%
23.	Franco-Nevada	TSE:FNV	Canada	Toronto	Royalty	23.2B	2.7%
24.	Cameco	TSE:CCO	Canada	Saskatoon	Uranium	22.6B	5.4%
25.	Ivanhoe Mines	TSE:IVN	Canada	Vancouver	Copper	20.4B	20.2%
26.	Yanzhou Coal	SHSE:600188	China	Zoucheng	Coal	19.8B	-3.5%
27.	Polyus	MCX:PLZL	Russia	Moscow	Precious Metals	18.9B	-0.9%
28.	Shandong Gold Mining	SHSE:600547	China	Jinan	Precious Metals	17.0B	10.8%
29.	Norilsk Nickel	MCX:GMKN	Russia	Moscow	Diversified	16.9B	-27.5%
30.	Gold Fields	JSE:GFI	South Africa	Johannesburg	Precious Metals	14.0B	6.0%
31.	Northern Star Resources	ASX:NST	Australia	Perth	Precious Metals	12.4B	25.9%
32.	Albermarle	NYSE:ALB	US	Charlotte	Lithium	12.0B	6.9%
33.	SQM	NYSE:SQM	Chile	Santiago	Lithium	11.9B	2.3%
34.	Kinross Gold	TSE:K	Canada	Toronto	Precious Metals	11.6B	14.2%
35.	First Quantum Minerals	TSE:FM	Canada	Vancouver	Copper	11.4B	5.4%
36.	South32	ASX:S32	Australia	Perth	Base Metals	11.3B	1.3%
37.	AngloGold Ashanti	NYSE:AU	UK	London	Precious Metals	11.0B	5.2%
38.	China Northern Rare Earth	SHSE:600111	China	Baotou	Rare Earth	10.6B	18.5%
39.	Anglo American Platinum	JSE:AMS	South Africa	Johannesburg	Precious Metals	10.0B	23.5%
40.	Jiangxi Copper	SHSE:600362	China	Guixi City	Copper	10.0B	3.3%
41.	Kazatomprom	LON:KAP	Kazakhstan	Nur-Sultan	Uranium	9.9B	-4.2%
42.	Boliden	STO:BOL	Sweden	Stockholm	Diversified	9.2B	5.4%
43.	Royal Gold	NASDAQ:RGLD	US	Denver	Royalty	9.1B	11.0%
4...	Ganfeng Lithium	HKG:1772	China	Jiangxi	Lithium	9.0B	26.3%
45.	Mosaic	NYSE:MOS	US	Plymouth	Fertilizer	8.6B	-7.6%
46.	Sumitomo Metal Mining	TYO:5713	Japan	Tokyo	Base Metals	8.5B	2.3%
47.	Lundin Mining	TSE:LUN	Canada	Vancouver	Copper	8.3B	-4.5%
48.	Alamos Gold	TSE:AGI	Toronto	Canada	Precious Metals	8.2B	31.5%
49.	KGHM	WSE:KGH	Poland	Lubin	Copper	8.2B	11.4%
50.	Pan American Silver	TSE:PAAS	Canada	Vancouver	Precious Metals	7.8B	8.3%

В конце третьего квартала 2024 года совокупная рыночная капитализация 50 самых ценных в мире майнинговых компаний по версии MINING.COM составила 1,51 триллиона

долларов, что почти на 76 миллиардов долларов больше, чем в конце июня, в основном за счёт акций золотодобывающих компаний и компаний, занимающихся добычей критических полезных ископаемых.

Общая стоимость акций крупнейших в мире горнодобывающих компаний выросла на довольно скромные 8% по сравнению с концом сентября прошлого года и, несмотря на хороший рост, всё ещё на 240 миллиардов долларов ниже пикового значения, достигнутого во втором квартале 2022 года.

Рейтинги, стоимость запасов золота растут (рис. 2).



Стоимость драгоценных металлов и компаний, занимающихся их добычей, выросла в общей сложности на 42 миллиарда долларов, или на 16%, за квартал, и акции золотодобывающих компаний лидируют по доходности.

Если бы не ограниченная ликвидность акций российской компании «Полюс», которые за три месяца немного подешевели, несмотря на впечатляющие результаты золота, влияние компании на топ-50 было бы ещё более заметным.

Канадская компания Alamos Gold впервые вошла в топ-50, поднявшись на 31% и заняв 48-е место с капитализацией 8,2 млрд долларов на конец квартала, в то время как новичок второго квартала Pan American Silver (после поглощения Yamana Gold) держится на 50-м месте.

В прошлом месяце компания Alamos Gold повысила прогноз по добыче более чем на 20% на 2025–2026 годы с учётом рудника Магино и его интеграции с рудником Айленд-Голд в Онтарио. Компания, базирующаяся в Торонто, в долгосрочной перспективе планирует увеличить объёмы добычи до 900 000 унций в год.

В 2025 году Узбекистан готовится к IPO Навоийского горно-металлургического комбината — четвёртой по величине золотодобывающей компании в мире и крупного производителя урана. НГМК разместил облигации на 1 миллиард долларов, что стало первым выпуском облигаций золотодобывающей компании на мировом долговом рынке с июня 2023 года.

«Навои» должен легко войти в топ-50 производителей золота благодаря владению крупнейшим в мире золотым рудником Мурунтау и ежегодной добыче 2,9 млн унций при качестве и себестоимости добычи, которым может позавидовать отрасль.

На карьере Мурунтау к юго-западу от пустыни Кызылкум, который изначально разрабатывался в советское время как источник урана, запасы золота оцениваются примерно в 130 миллионов унций.

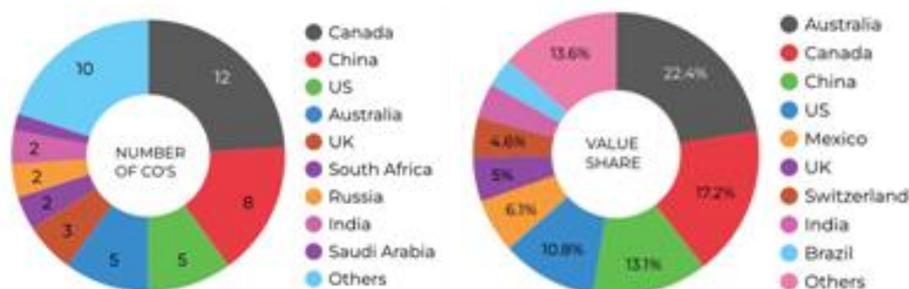
Специалисты по меди и те, у кого есть «жирные» золотые кредиты, в совокупности заработали 36% с начала года, поскольку цена на медь продолжает колебаться в районе 10 000 долларов за тонну, но в третьем квартале динамика резко замедлилась, и группа заработала всего 7,2 миллиарда долларов дополнительной рыночной стоимости за квартал.

Стремительный рост акций Amman Mineral также резко прекратился в течение квартала: за три месяца акции потеряли 18% и едва не выпали из топ-10.

Однако инвесторы, купившие Amman, владельца третьего по величине в мире медного рудника, по цене IPO в Джакарте год назад, до сих пор наслаждаются 400-процентной прибылью.

Компания Southern Copper, занимающая третье место в мире по стоимости акций в горнодобывающей отрасли, похоже, укрепила свои позиции после двузначного роста в третьем квартале по сравнению с гораздо более сдержанными результатами Freeport-McMoRan, которой теперь нужно увеличить рыночную капитализацию на 20 миллиардов долларов, чтобы обойти своего конкурента из Мехико.

Экономия на литии (рис. 3)



Вотум доверия Rio Tinto в отношении долгосрочного будущего литиевого сектора (и его собственной способности проводить слияния и поглощения) доминировал в новостях в начале декабря, но стоит отметить, что рост акций Arcadium более чем на 90% с момента объявления о предложении, полностью состоящем из наличных, недостаточен для того, чтобы акции попали в рейтинг.

Компания Rio Tinto объявила, что приобретёт Arcadium Lithium за 6,7 миллиарда долларов в рамках сделки, которая сделает её одним из крупнейших в мире производителей лития.

Крупнейший в мире производитель получит доступ к широкому спектру шахт, перерабатывающих предприятий и месторождений Arcadium, а также к клиентской базе, в которую входят автопроизводители Tesla, BMW и General Motors.

Проект Rio «Ринкон» в Аргентине должен начать добычу в конце этого года, а для получения всех необходимых разрешений на проект «Джадар» в Сербии может потребоваться не менее двух лет.

Ниже приведён список крупнейших производителей лития в мире по рыночной капитализации:

Albemarle — крупнейший в мире производитель лития с рыночной капитализацией около 12 миллиардов долларов. Компания управляет единственным действующим литиевым рудником в Северной Америке, а также ведёт деятельность в Чили и Западной Австралии.

Компания владеет совместными предприятиями в Австралии с Mineral Resources на руднике Воджина и с Tianqi Lithium на руднике Гринбушес.

В 2023 году компания произвела 39 000 тонн металлического лития.

Химико-горное общество Чили (SQM) является вторым по величине производителем лития с рыночной капитализацией в 11,43 миллиарда долларов. Китайской компании Tianqi Lithium принадлежит около пятой части акций компании.

Согласно годовому отчёту, в прошлом году SQM произвела около 165 500 тонн гидроксида и карбоната лития.

Ganfeng Lithium. Рыночная капитализация китайской компании составляет 9,37 миллиарда долларов. Она также владеет 6,16% акций австралийской компании Pilbara Minerals. Компания ведёт деятельность в Западной Австралии, Аргентине, Мексике и Китае.

Tianqi Lithium, рыночная капитализация которой составляет 8,11 миллиарда долларов, работает в Австралии, Чили и Китае.

Компания *Mineral Resources* из Австралии имеет рыночную капитализацию в 7,12 миллиарда долларов и является крупнейшим в мире производителем сподумена из твёрдых

пород. Она владеет долями в нескольких компаниях-разработчиках, таких как Global Lithium, Delta Lithium и Wildcat Resources.

Согласно годовому отчёту за прошлый год, компания отгрузила 847 000 сухих метрических тонн (dmt) сподуменового концентрата.

Рыночная капитализация *Pilbara Minerals* составляет 6,34 миллиарда долларов, и компания управляет рудником Пилгангура в Западной Австралии. В августе она сделала предложение в размере 559,9 миллиона австралийских долларов за более мелкую компанию Latin Resources, чтобы получить доступ к её бразильским активам.

В 2023 году было произведено 620 147 тонн концентрата сподумена.

Рыночная капитализация *Arcadium Lithium* составляет 3,31 миллиарда долларов. Компания была образована 4 января 2024 года в результате слияния Allkem и Livent. У неё есть горнодобывающие активы в Аргентине и Австралии, а также активы по переработке в США, Китае, Японии и Великобритании.

По состоянию на 2023 год обе компании вместе произвели около 29 661 тонны карбоната лития, а Allkem произвела 239 312 тонн сподуменового концентрата.

Рыночная капитализация *Liontown Resources* составляет 1,45 миллиарда долларов, компания работает в Западной Австралии.

В сентябре компания отгрузила первую партию литиевого концентрата сподумена весом 11 855 влажных метрических тонн

В этом году из рейтинга выбыли три производителя лития: австралийские компании Pilbara Minerals и Mineral Resources и китайская Tianqi Lithium, поскольку глубокий спад цен на металл для аккумуляторов продолжает сказываться на них.

Компания *Ganfeng Lithium*, занимавшая 50-е место в прошлом квартале, поднялась на шесть позиций после того, как в конце квартала на китайских фондовых рынках произошло ралли, вызванное стимулирующими мерами, а показатели Tianqi в октябре должны позволить ей вернуться в топ-50 в ближайшее время.

В конце июня «Ганьфэн» едва удерживался на 50-м месте, и, учитывая, что цены на золото продолжают расти, а две золотодобывающие компании — «Иньтай» и «Аламос» — находятся в подвешенном состоянии, в ближайшие месяцы в топ-50 могут войти только три производителя лития.

После пика во втором квартале 2022 года, когда совокупная стоимость оставшихся запасов лития составила почти 120 миллиардов долларов, рыночная стоимость оставшихся запасов лития сократилась до 34 миллиардов долларов.

Добыча железной руды сокращается.

Несмотря на незначительное улучшение показателей в течение квартала, традиционная «большая пятёрка» горнодобывающей промышленности — BHP, Rio Tinto, Glencore, Vale и Anglo American — остаётся в минусе в 2024 году, потеряв 24 миллиарда долларов с начала года.

Диверсифицированные акции «Большой пятёрки» сейчас составляют 29% от общего индекса, по сравнению с 38% в конце 2022 года.

Не слишком радужные перспективы в сфере добычи железной руды — несмотря на недавнее стимулирование экономики Китаем — привели к тому, что Fortescue снова оказалась в списке крупнейших проигравших, а Cleveland Cliffs выбыла из рейтинга из-за снижения добычи железной руды в США на 37% в этом году, что усугубилось неспособностью компании извлечь выгоду из блокировки сделки Nippon-US Steel.

Доля железной руды в топ-50 сократилась за последние пару лет: бразильская компания CSN Mineração выбыла из списка в первом квартале этого года, а Kumba Iron Ore, контролируемая англосаксами и зарегистрированная на отдельной бирже, потеряла связь с высшим эшелонном после падения на 40% с начала года.

Согласно данным Геологической службы США, агентство Nasdaq обновило список 10 стран топ-производителей железной руды в мире на 2024 год.

1. Австралия. Крупнейшая страна-производитель железной руды, с добычей пригодной железной руды в 960 млн тонн в 2023 году. Ведущими производителями железной руды в Австралии являются BHP, Rio Tinto и Fortescue Metals Group.

2. Бразилия. В Бразилии производство железа достигло 440 млн тонн пригодной для использования железной руды в 2023 году.

Крупнейшими железорудными районами в стране являются штаты Пара и Минас-Жерайс, на которые в совокупности приходится 98% годового производства железной руды в Бразилии. Ведущая компания – Vale.

3. Китай. Производство в Китае составило 280 млн тонн пригодной для использования железной руды в 2023 году.

Крупнейшим месторождением железной руды в Китае является железный рудник Датаигоу в провинции Лайонин с объемом производства 9,07 млн тонн в 2023 году, который принадлежит Glory Harvest Group Holdings.

5. Россия. Добыча железной руды в России в 2023 году составила 88 млн тонн, что делает ее пятой по величине страной-производителем железа в мире. В Белгородской области находятся два крупнейших в стране рудника по добыче железной руды: Лебединский ГОК УК Металлоинвест и Стойленский ГОК Новолипецкого металлургического комбината.

6. *Иран.* В 2023 году Иран накопил 77 млн. тонн производства железа в виде пригодной для использования железной руды. Производство железа в стране в последние годы растет — она была восьмым по величине производителем железа в 2022 году и десятым в 2021 году. Одним из важнейших железорудных рудников в стране является Гол-Гохар в провинции Керман.

7. *Канада.* Производство железной руды в Канаде составило 70 млн. тонн пригодной для использования железной руды при 42 млн. тонн содержания железа в 2023 году.

Champion Iron— одна из компаний, производящих железную руду в стране.

8. *Южная Африка.* Производство железа в Южной Африке составило 61 млн тонн пригодной железной руды и 39 млн тонн содержания железа в 2023 году. Производство страны значительно сократилось за последние несколько лет, с 73,1 миллиона тонн и 46,5 миллиона тонн двумя годами ранее

Kumba Iron Ore является крупнейшим производителем железной руды в Африке.

9. *Казахстан.* Производство железной руды в Казахстане в 2023 году составило 53 млн тонн пригодной для использования железной руды. В последние годы оно также снизилось.

В Казахстане действует несколько железорудных рудников, четыре из пяти крупнейших принадлежат Eurasian Resources Group.

10. *Швеция.* Производство железа в Швеции в 2023 году составило 38 млн тонн пригодной железной руды. Производство железной руды в стране росло в течение последних полутора десятилетий.

Крупнейшим железорудным рудником страны является государственный рудник Кируна Luossavaara-Kiirunavaara (LKAB), который работает уже более 100 лет.

2. Обзор компаний США: разведка месторождений меди, золота, редкоземельных металлов и др.

Соединенные Штаты имеют долгую историю добычи полезных ископаемых и разведки месторождений и богаты цветными и драгоценными металлами, а также новыми энергетическими металлами и ураном. Вот семь компаний, у которых есть крупные месторождения и проекты по их разработке.

American Pacific Mining (CSE: USGD; US-OTC: USGDF) в течение сентября опубликовала результаты своей деятельности на медно-золотом месторождении Мэдисон в Монтане, а в августе завершила программу бурения на 6036 метров на другом своем ключевом активе — медно-цинковом вулканогенном месторождении массивных сульфидов (VMS) Палмер на юго-востоке Аляски.

Первоначальное разведочное и эксплуатационное бурение, проведённое этим летом в Мэдисоне, показало, что значительные запасы полезных ископаемых находятся за пределами ранее выработанных участков. Основные моменты включали 12,3 метра 10,36 грамма золота и 0,88% меди из скважины глубиной 115 метров в скважине АРММAD24-06; 2,9 метра 3,17 грамма золота и 2,41% меди со 145 метров в скважине АРММAD24-08; и 8,1 метра 3,66% меди, начиная с 187,2 метров в скважине АРММAD24-09.

Компания также недавно получила доступ к верхним уровням рудника и собрала четыре образца из старых выработок. В образцах, представленных в конце сентября, было 45,5% меди и 2,17 грамма золота на тонну, а также 31% меди и 8,4 грамма золота.

В Палмере компания пробурила 6036 метров в 19 скважинах в этом году. Программа, финансируемая в рамках совместного предприятия с Dowa Metals & Mining, владельцем крупнейшего в Японии завода по производству цинка, была направлена на развитие результатов кампании 2023 года.

Последняя партия результатов анализов за 2023 год, опубликованная в январе, включала четыре самых значительных пробных отхода меди, когда-либо добытых в Палмере. Они включали 43,8 метра меди с содержанием 6,54%, 3,15% цинка, 0,42 грамма золота и 27,97 грамма серебра (8,22% в пересчёте на медь) на глубине 170 метров в скважине СМR23-172.

Предварительная экономическая оценка (РЕА) для Палмера, опубликованная в 2019 году, показала, что чистая приведенная стоимость проекта (при ставке дисконтирования 7%) в течение 11 лет составит 266 миллионов долларов США после уплаты налогов. Капитальные затраты оценивались в 278 миллионов долларов США, внутренняя норма доходности после уплаты налогов составила 21%, а срок окупаемости — 3,3 года. Прогнозируется, что за время эксплуатации рудника будет добыто около 1 миллиарда фунтов цинка, 196 миллионов фунтов меди, 18 миллионов унций серебра и 91 000 унций золота.

Рыночная капитализация American Pacific Mining составляет около 33 миллионов долларов.

Hudbay Minerals (TSX: НВМ; NYSE: НВМ) получила разрешение на защиту водоносного горизонта для проекта Copper World в южной Аризоне, что приблизило предполагаемый карьер к началу добычи.

Ожидается, что Copper World, один из самых высококачественных проектов по добыче меди открытым способом в Северной и Южной Америке, будет производить 85 000 тонн меди в год в течение 20 лет при средней себестоимости и совокупных эксплуатационных расходах в размере 1,47 и 1,81 доллара США за фунт меди соответственно.

Предварительное технико-экономическое обоснование, проведенное в прошлом году для первого этапа, показало, что чистая приведенная стоимость после уплаты налогов (при ставке дисконтирования 8%) составит 1,1 миллиарда долларов США, а внутренняя норма доходности при цене меди 3,75 доллара США за фунт составит 19%. Капитальные затраты оценивались в 1,3 миллиарда долларов США, а срок окупаемости составил чуть менее шести лет.

Компания Copper World имеет 1,2 миллиарда измеренных и предполагаемых тонн руды с содержанием меди 0,42% для получения 5 миллионов фунтов меди на месте добычи.

В прошлом году компания Hudbay получила благоприятное решение Апелляционного суда девятого округа США, которое отменило решение Службы охраны рыбных ресурсов и диких животных США о признании территории Copper World критически важной средой обитания для ягуаров. Тогда компания Hudbay заявила, что это решение не повлияет на процесс выдачи разрешений на первом этапе, но, как ожидается, упростит получение федеральных разрешений на втором этапе.

Коппер-Уорлд, ранее называвшийся Роузмонтом, находится примерно в 45 км к юго-востоку от Тусона в округе Пима.

Рыночная капитализация Hudbay Minerals составляет около 5 миллиардов долларов.

Lion Copper and Gold (TSXV: LEO; US-OTC: LCGMF) в сентябре опубликовала результаты разведочного бурения на месторождениях Йерингтон и Макартур, которые являются частью медного проекта Йерингтон в Неваде, в 81 км к юго-востоку от Рино.

В ходе бурения на месторождении Йерингтон был пройден 128-метровый интервал с содержанием общей меди 0,12% в скважине YM-047, в том числе 16-метровый интервал с содержанием общей меди 0,36%. Под общей медью понимается содержание меди в руде, отправляемой на обогатительную фабрику для металлургического извлечения методом флотации. В скважине YM-047A был пройден 1371 метр с содержанием общей меди 0,2% на глубине 194 метра.

В Макартуре анализы показали, что в скважине QM-336 на глубине 31 метр содержится 9 метров меди с общим содержанием 0,21%, а на глубине 53 метра в скважине QM340 — 43 метра меди с общим содержанием 0,22%.

Rio Tinto Nuton (ASX: RIO; LSE: RIO; NYSE: RIO) имеет возможность получить до 65% акций проекта Yerington от Lion Copper and Gold.

В PEA 2023 года предусматривалось использование открытого карьера и кучного выщелачивания с применением технологий Nuton для извлечения катодной меди из первичных сульфидных материалов, что позволило бы отказаться от концентраторных, хвостохранилищных и плавильных операций.

В исследовании описывался 12-летний срок эксплуатации рудников Йерингтон и Макартур, на которых добывалось в среднем 117 миллионов фунтов меди в год, или в общей сложности 1,4 миллиарда фунтов металла при средних эксплуатационных расходах в 2,20 доллара США за фунт выплачиваемой меди. При цене меди в 3,85 доллара США за фунт чистая приведенная стоимость (при ставке дисконтирования 7%) составила 356 миллионов долларов США, а внутренняя норма доходности — 17,4%. Капитальные затраты составили 413 миллионов долларов США, а срок окупаемости после уплаты налогов — пять лет.

Рыночная капитализация Lion Copper and Gold составляет примерно 27 миллионов долларов.

MP Materials (NYSE: MP) (калифорнийский производитель редкоземельных металлов) подписал контракт на поставку неодимового и празеодимового (NdPr) оксида редкоземельных металлов на сумму 11 миллионов долларов США с Министерством обороны США. Компания также заключила соглашение с неназванным мировым автопроизводителем о «значительных объёмах поставок», о чём сообщила в августе.

На руднике MP's Mountain Pass, одном из двух рудников по добыче редкоземельных металлов в Северной и Южной Америке, находится одно из самых богатых в мире месторождений редкоземельных элементов. В каждом из последних трёх календарных лет производство оксидов редкоземельных металлов в концентрате на обогатительной фабрике превышало 41 000 тонн, и в течение следующих четырёх лет компания планирует увеличить этот показатель до 60 000 тонн в год. Около 15% оксидов редкоземельных металлов, содержащихся в концентрате, — это NdPr.

В прошлом году компания MP Materials вновь ввела в эксплуатацию перерабатывающие мощности в Маунтин-Пасс и начала производить из концентрата разделённые и очищенные редкоземельные продукты. На предприятии производятся редкоземельные продукты, в том числе оксид NdPr, лантан, церий и концентрат тяжёлых редкоземельных металлов.

Компания Mountain Pass, расположенная на южном склоне горного хребта Кларк в Калифорнии, примерно в 85 км к юго-западу от Лас-Вегаса, штат Невада, за три месяца, закончившихся 30 июня, произвела 272 тонны оксида NdPr, что более чем в два раза превышает производство в первом квартале, составившее 131 тонну, сообщает компания.

В январе правительство США предоставило компании налоговый вычет в размере 58,5 млн долларов США на реализацию передовых энергетических проектов, чтобы помочь ей построить полностью интегрированное предприятие по производству редкоземельных магнитов в Форт-Уэрте, штат Техас. Строительство началось в апреле 2022 года.

Компания планирует начать производство неодимовых магнитов из железа и бора (NdFeB) к концу 2025 года. Оксид NdPr, производимый на заводе Mountain Pass, будет восстановлен до металла NdPr, а затем преобразован в сплав NdFeB и готовые магниты. Магниты используются в электродвигателях и генераторах, которые питают гибридные и электрические транспортные средства, роботов, ветряные турбины, дроны, электронику и критически важные системы обороны.

Рыночная капитализация MP Materials составляет около 2,9 миллиарда долларов США.

Strathmore Plus Uranium (TSXV: SUU; US-OTC: SUUFF) начала бурение на своем проекте Beaver Rim рядом с Cameco (TSX: CCO; NYSE: CCJ) на месторождении Gas Hills в центральном Вайоминге.

Компания Strathmore получила разрешение на бурение на глубину 3048 метров и планирует подтвердить исторические результаты и распространить минерализацию на неизведанные территории. Недавно компания удвоила площадь проекта, увеличив её до 22,2 кв. км.

Группа месторождений Бивер-Рим расположена к югу от месторождения Пич, принадлежащего компании Cameco. Компания American Nuclear исследовала его в 1970-х годах, Cameco — в период с 1990 по начало 2000 года, а Strathmore Minerals — в 2012 году. Уран был обнаружен на глубине 213–305 метров в слоистых отложениях вайомингского типа в богатых аркозитом песчаниках формации Уинд-Ривер, относящейся к эоцену.

У Стратмора есть ещё два разрешённых проекта по добыче урана — «Агат» и «Ночная сова». Как и «Бивер Рим», «Агат» содержит минерализацию, типичную для месторождений типа «ролл фронт» в Вайоминге, а «Ночная сова» — это бывший действующий карьер, который работал в начале 1960-х годов.

Агатовая минерализация в бассейне Ширли в Вайоминге залегает неглубоко, на глубине от 5 до 46 метров. Большая часть минерализации находится ниже уровня грунтовых вод, что делает её пригодной для добычи на месте.

На месторождении «Ночная сова», также расположенном в бассейне Ширли, было добыто 84 тонны руды с содержанием 0,24% U₃O₈. В конце 1950-х и 1960-х годах его разрабатывали на поверхности или вблизи неё. Добыча прекратилась из-за низких цен на уран, составлявших около 7 долларов США за фунт, и Стратмор говорит, что «Ночная сова» не была должным образом изучена с использованием современных методов разведки.

Рыночная капитализация Strathmore Plus Uranium составляет около 13 миллионов долларов.

Ucore Rare Metals (TSXV: UCU; US-OTC: UURAF) специализируется на запатентованной технологии разделения редкоземельных элементов RapidSX и совершенствует технологический процесс на коммерческом и демонстрационном заводе в Кингстоне, Онтарио.

Компания производит тяжёлые и лёгкие хлориды редкоземельных металлов из различных видов сырья, включая монацит, бастнезит, ионообменные глины и ксенотим. Она также разработала технологию производства оксидов редкоземельных металлов в килограммовых количествах из полученных хлоридов редкоземельных металлов.

Компания планирует использовать эту технологию для создания предприятия по переработке тяжёлых и лёгких оксидов редкоземельных металлов в Александре, штат Луизиана. В январе Ucore подписала многолетний договор аренды на заброшенном объекте на территории бывшей базы ВВС.

В сентябре Ucore подписала меморандум о взаимопонимании с австралийской ABX Group (ASX: ABX). Две компании будут работать над соглашением о закупках, в соответствии с которым ABX будет поставлять Ucore смешанный карбонат редкоземельных металлов из своего месторождения редкоземельных металлов в Тасмании. Ucore надеется получить преимущественное право на 50% продукции ABX в течение пяти лет. Компании также рассмотрят возможность инвестирования Ucore в проект ABX.

Ucore также недавно подписала меморандум о взаимопонимании с Meteoric Resources (ASX: MEI). Компания из Перта будет поставлять Ucore 3000 тонн оксидов редкоземельных металлов (TREO) в год со своего проекта по добыче редкоземельной ионной глины в Кальдейре в бразильском штате Минас-Жерайс.

Ключевыми редкоземельными элементами, которые Ucore планирует перерабатывать на комплексе в Луизиане после запуска производства, будут празеодим, неодим, тербий и диспрозий. SMC будет предназначен для переработки до шести различных источников сырья из шахт в Западном полушарии.

Помимо комплекса в Луизиане, у компании есть долгосрочные планы по разработке проекта Vokan Mountain по добыче редкоземельных металлов на острове Принца Уэльского на юго-востоке Аляски.

Рыночная капитализация Ucore Rare Metals составляет около 37,7 миллиона долларов.

Western Alaska Minerals (TSXV: WAM) в проекте Иллинойс-Крик на западе штата разрабатывает месторождение оксидного золота и серебра, а также месторождение карбонатного замещения (CRD) под названием Уотерпамп-Крик, приуроченное к доломитовой толще Иллинойс-Крик.

Первоначальная оценка ресурсов в феврале для Уотерпамп-Крик показала, что 2,4 миллиона предполагаемых тонн содержат 279 граммов серебра, 9,84% свинца и 11,25% цинка (977 граммов в эквиваленте серебра или 26,32% в эквиваленте цинка) на 75 миллионов унций в эквиваленте серебра или 1,4 миллиарда фунтов в эквиваленте цинка.

В июне компания начала программу бурения, чтобы найти больше высококачественных сульфидных минералов вдоль 6-8-километрового участка между Уотерпамп-Крик и историческим рудником Иллинойс-Крик.

Целью было объединить отдельные зоны системы CRD, начав с двух целей: зоны LH к юго-западу от Уотерпам-Крик и Уорм-Спрингс к востоку от исторического золото-серебряного рудника.

На месторождении Уорм-Спрингс компания вскрыла минерализацию в виде замещения серебра, цинка и свинца с выходом 1,2 метра на 687 граммов серебра, 33,64% свинца и 0,1% цинка, начиная с глубины 213 метров, в том числе 3,2 метра на 88,5 граммов серебра, 2,4% свинца и 4% цинка в скважине IC24-0005. Анализы по программе находятся в стадии обработки.

По словам компании, минерализация в Уотерпамп-Крик имеет те же геологические характеристики, что и в других системах CRD, включая месторождения Санта-Эулалия и Найса в Мексике, месторождение Тейлор-Саннисайд в Аризоне и месторождение Тинтик в Юте.

Рыночная капитализация Western Alaska Minerals составляет около 28 миллионов долларов

3. Завершенные проекты ГРП за рубежом.

Был проведен первичный анализ около 440 зарубежных технических отчетов (NI 43-101 english) по ГРП различных стадий в период с 10/2023 по 11/2024 гг. Работы велись в основном юниорными канадскими, американскими и австралийскими компаниями на объектах ТПИ в более чем 20 странах на всех континентах. Направленность и объем этих работ в соответствии с зарубежной классификацией типов месторождений ТПИ показана на рисунке 4.

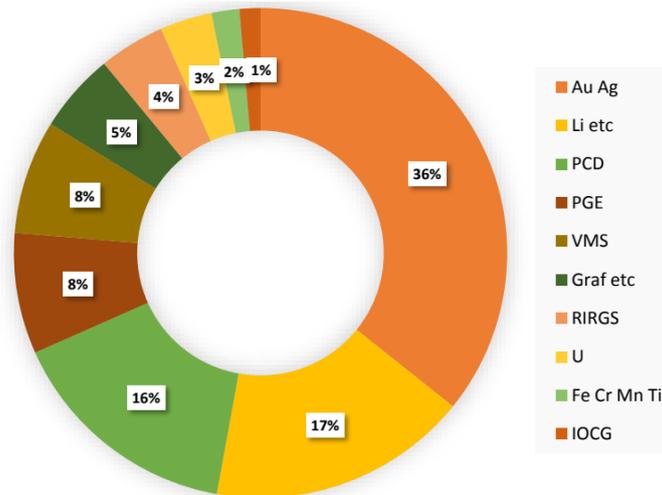


Рис. 4 Завершенные объекты ГРП в мире 2024 г.

Неизменными лидерами по количеству объектов ГРП традиционно являются «золотые» объекты - 36%, включающие основной «орогенный» жильный золотой и золото-серебряный типы, а также «золото древних формаций» и в меньшей степени «карлинский» тип, россыпи и др.

На второе место, также как и в прошлом году, опередив медно-порфировые (15% Cu-Au и Cu-Mo), вышли редкометально-редкоземельные объекты (17%), причем более 75% - это литиевые пегматиты.

Важными становятся объекты нерудных ГРП: графита и др.

Стабильна активность западных компаний на ГРП урановорудных объектов (5%) в связи с конъюнктурой мирового рынка, в первую очередь на объекты типа «несогласия» в бассейне Атабаска, Канада.

Наибольший интерес для зарубежных добывающих компаний, помимо золотых, представляют комплексные рудные месторождения (в сумме более 50% объектов ГРП):

1. REE Rare metal-earth deposits (Na, Nb, Be, LREE, HREE, etc)
2. PCD Porphyry copper deposits (Cu-Au-Mo etc)
3. VMS Volcanic massive sulphide deposits (Zn-Pb-Ag-Au-Cu etc)
4. PGE Platinum group element deposits (Ni-Cu-Pt-Co etc)
5. RIRGS Epithermal Systems (Sn, Ag, Zn, Pb, Bi, W, Au, Sb)
6. IOGC Iron oxide copper gold ore deposits (Cu-Au-Co-U-W etc)

Значимыми типами ТПИ для РФ по-прежнему являются объекты, связанные с активными молодыми и древними континентальными окраинами: (1) PCD (с золотом, молибденом, вольфрамом, полиметаллами и др.); (2) нетрадиционные для РФ IOGC (с медью, золотом, серебром, ураном, кобальтом, REE и др.); (3) VMS (гидротермально-осадочные с золотом,

медью, серебром и др. в вулканогенно-осадочных толщах); (4) PGE объекты («Норильский тип»); а также (5) разнотипные коренные редкометально-редкоземельные месторождения.

II. ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЕ СКАНИРОВАНИЕ КЕРНА ПРИ КАРТИРОВАНИИ ЛИНЕЙНЫХ ПОИСКОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОРФИРОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ [5].

1. Введение.

Поисково-разведочные работы, особенно на «скрытые» рудные объекты, включают в себя тысячи километров кернов в регионах с высоким потенциалом минеральных ресурсов. Традиционно керн анализируется визуально геологами на месте и затем подвергается геохимическому анализу. Эти методы медленные, а минералогическая информация, визуально извлекаемая из керна, ограничена и обычно зависит от субъективности наблюдателя. В течение последнего десятилетия методы гиперспектральной визуализации все чаще используются в дополнение к традиционным методам каротажа и обеспечивают быстрые, эффективные и непредвзятые средства извлечения ценной информации о составе. Однако большинство существующих инструментов обработки гиперспектральных данных нацелены только на минералогическую информацию о составе, а не на пространственное распределение и геометрию минералов, составляющих руду. Для этой цели в данном материале предлагается рабочий процесс, объединяющий анализ диагностики и содержания минералов с их пространственным распределением.

Обычные гиперспектральные датчики охватывают видимую, ближнюю инфракрасную (VNIR) и коротковолновую инфракрасную (SWIR) области электромагнитного спектра. В этих диапазонах специфические характеристики поглощения позволяют идентифицировать распространенные группы минералов, такие как филлосиликаты, амфиболы, оксиды и гидроксиды железа, карбонаты и гидратированные сульфаты, фосфаты и арсенаты. Некоторые из этих групп минералов связаны с гидротермальными изменениями и, как известно, встречаются в различных минеральных системах. Они обычно используются в качестве поисковых признаков, что делает их ключом к выявлению рудных объектов.

В настоящее время предложено несколько методов анализа гиперспектральных характеристик керна. Среди них - соотношения полос и минимальной длины волны являются полезными инструментами для оценки и визуализации относительного содержания химических групп, характерных для конкретных минералов. Другой подход заключается в использовании spectral angle mapper (SAM), классификатора, который работает на основе меры сходства между неизвестным спектром и эталонными спектрами. Эталонные спектры получены либо из спектральных библиотек, либо из конечных элементов, например, методом индекса чистоты пикселей, за которым следует n-мерный визуализатор. Этот подход широко используется благодаря доступности алгоритмов в распространенном программном обеспечении, таком как ENVI (Exelis Visual Information Solutions, Боулдер, Колорадо, США).

Хотя вышеупомянутые инструменты могут обеспечить хорошие результаты, пакетная реализация сложна, поскольку требует активного взаимодействия человека.

Несмотря на прогресс в (полу) автоматической методологии, в немногих исследованиях рассматривались вопросы идентификации и извлечения структурных особенностей. Хотя, этот вид анализа особенно актуален для жильной минерализации, такой как встречающаяся в месторождениях порфирового типа. Характеристика ореолов изменений, как с точки зрения ширины, так и состава, имеет решающее значение для оценки стадии минерализации/изменений. Состав гидротермально-метасоматических изменений и венозных ореолов представляет собой важный показатель в пределах минерализованной системы для параметров оруденения. Был создан метод выращивания затравленной области, сочетающий анализ сходства и однородности оптических данных (разделение коротковолновых инфракрасных спектров и 3-полосных изображений в естественных цветах RGB) с картой границ для выделения кварцевых и карбонатных жил. Получаемые результаты охватывают извлечение предопределенных типов жил и не включают их ориентацию, которая для картирования и моделирования минеральной системы типа порфира была бы ключевым атрибутом.

За последние два десятилетия было предложено множество методов для извлечения линейных объектов из изображений. Наиболее часто используемые подходы основаны на алгоритмах обнаружения границ, которые идентифицируют разрывы в изображениях в оттенках серого. Эти методы широко использовались для извлечения структурных элементов, таких как уступы разломов и линеаменты, но часто их трудно применить для извлечения структурных образований, таких как жилы. Методы обнаружения краев плохо работают, когда края объекта гладкие (т. е. постепенный переход от ореола изменения жил к матрице) и очень чувствительны к шуму. Альтернативный подход основан на алгоритмах обнаружения гребней. В то время как назначение детекторов краев заключается в выделении границы объекта, обнаружение гребней позволяет идентифицировать большую ось симметрии вытянутого объекта, используя кривизну, связанную с более яркими или темными компонентами на изображении в оттенках серого. Эти алгоритмы позволяют целенаправленно определять линейные компоненты изображения и широко используются в различных областях, таких как медицина и др., для выделения криволинейных объектов, таких как кровеносные сосуды или дорожные и дренажные сети.

В этом исследовании разработан и протестирован рабочий процесс, позволяющий извлекать как минералогическую, так и структурную информацию из образцов керна. Подход сочетает в себе анализ гиперспектральных данных и методы обработки изображений. Рабочий

процесс состоит из трех основных этапов: (1) извлечение конечных элементов и спектральное разделение, за которым следует (2) картирование полезных признаков и (3) выявление жил. В результате получают карты признаков, иллюстрирующие распределение основных минеральных комплексов, и распределения жил, включая состав, расчетную распространенность и азимут различных типов оруденения. Для порфировой минерализации, связанной с жильными комплексами, определение состава и плотности жил и оценка распространенности различных их типов могут представлять собой ключевые параметры при моделировании и оценке рудных тел.

Эффективность рабочего процесса оценивалась на основе образцов керна из проекта *Bolcana porphyry-copper gold* в Румынии. Образцы были взяты из типичных зон изменений на разных глубинах, чтобы продемонстрировать различный состав и структуру жил. Валидация достигается на основе минералогического анализа тонких срезов с высоким разрешением с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM), оснащенной программным обеспечением Mineral Liberation Analyzer (MLA).

2. Испытательный полигон.

Медно-золотая минерализованная система Болчана расположена в рудном районе Бред-Сакарэ в пределах Золотого четырехугольника в горах Южный Апушени, Румыния (рис. 1).

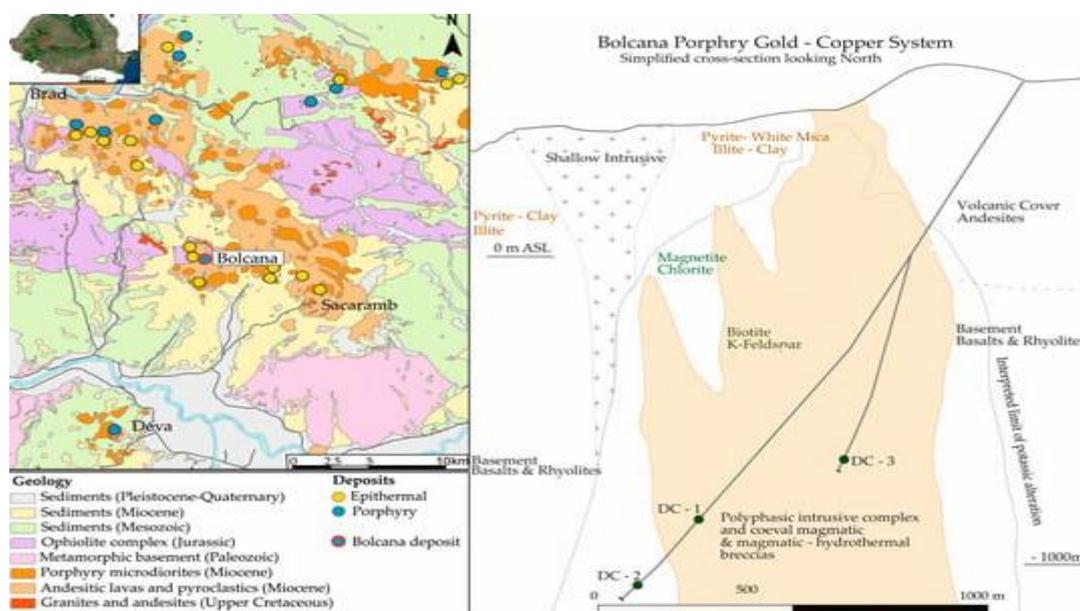


Рис. 1. Геологическая карта рудного района Бред-Сакарэ (слева) и поперечный разрез E-W м-ния порфиров Болчана с указанием местоположения использованных скважин (справа).

Золотой четырехугольник содержит около 20 месторождений порфирового типа и представляет собой крупнейшую в Европе эпитермальную Au-Ag-Te провинцию. Минерализация в Золотом четырехугольнике приурочена к неогеновым вулканическим

породам (14,9 и 9 млн лет назад). Основное направление распределения рудных залежей соответствует ESE-трендовой, правой системе сдвиговых разломов. Здесь фундамент состоит из андезитов средней юры–нижнего мела, базальтовых потоков лавы и пироклаستيки, а также риолитов нижнего мела, перекрытых палеоценовыми и миоценовыми осадочными сериями. Неогеновые вулканические и субвулканические тела вторгаются в фундамент и палеоценовые осадочные образования.

Месторождение Болкана представляет собой Cu–Au оруденение порфирового типа с соответствующими эпитермальными жилами, расположенными в микродиоритовом субвулканическом теле. Минерализация представлена халькопиритом, борнитом, халькоцитом, ковеллитом, пиритом, магнетитом, гематитом, молибденитом. Золото присутствует преимущественно в виде мелких включений в сульфидах меди. Минерализованное тело демонстрирует большое расширение на глубине и характеризуется большим калиевым ядром с широким переходом к натриево-кальциевым изменениям. Переход характеризуется присутствием хлорита в качестве основной распространяющейся фазы изменений.

3. Сбор данных.

Для тестирования предлагаемого рабочего процесса были отобраны образцы керна трех скважин (обозначенные DC-1, DC-2 и DC-3), которые демонстрируют вариабельность с точки зрения повсеместных изменений и типов жил. Образцы керна были взяты из калийной, натриево-кальциевой и промежуточных зон медно-золоторудного порфирового месторождения Болкана. Образцы репрезентативны с точки зрения жил и типов изменений для большего интервала бурением с керном (рис. 2). Ширина проанализированных поверхностей всех образцов составила 47 мм, а длина - около 290 мм. Керны были выбраны из интервалов однородного вида на основе визуальных наблюдений. При отборе проб также учитывалось наличие различных типов жил с точки зрения состава и мощности.

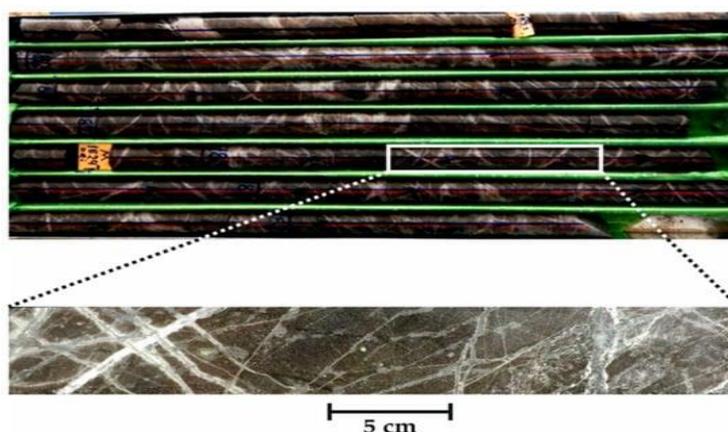


Рис. 2. Репрезентативный отбор проб из однородных интервалов керна.

3.1. Гиперспектральное сканирование керна.

Гиперспектральные данные были получены с помощью сканера керна SisuROCK (Spectral Imaging Ltd., Оулу, Финляндия), оснащенного гиперспектральным датчиком AisaFENIX VNIR-SWIR (Spectral Imaging Ltd., Оулу, Финляндия). Спецификация датчика и выбранные настройки приведены в таблице 1. Пространственное разрешение результирующих гиперспектральных сканирований составляет 1,5 мм / пиксель.

Табл. 1.

Технические характеристики и параметры настройки сканера керна SisuROCK и гиперспектрального датчика AisaFENIX VNIR-SWIR.

Parameter	Value
Wavelength Range	VNIR 380–970 nm SWIR 970–2500 nm
Sampling Distance	VNIR 1.7 nm SWIR 5.7 nm
Number of Bands	450
Spectral Binning	VNIR 4 SWIR 1
Field of View (FOV)	32.3°
Samples	384
Frame Rate	15 Hz
Scanning Speed	25.06 mm/s
Integration Time	VNIR 15 ms SWIR 4 ms
Spatial Binning	VNIR 2 SWIR 1

Преобразование в коэффициент отражения было выполнено с помощью программного обеспечения для сбора данных (LUMO Scanner версии 2018-5, Spectral Imaging Ltd., Оулу, Финляндия) с использованием эталонных панелей из ПТФЭ (> 99% VNIR и >95% SWIR). Для предварительной обработки снимки выбранных образцов керна были скорректированы и усреднены с помощью MERNuSTo toolbox. Между датчиками VNIR и SWIR была применена коррекция для компенсации пространственного сдвига, а геометрическая коррекция была использована для нейтрализации эффекта линзы. Скорректированные гиперспектральные данные были сглажены с использованием фильтра Савицкого-Голея (SavGol), чтобы скорректировать шум, присутствующий особенно в начале спектра в VNIR. Сглаживание было сочтено необходимым, поскольку шум в этой области спектра в противном случае сильно повлиял бы на производительность алгоритмов извлечения конечных элементов. После тестирования различных параметров для фильтра Савгола были использованы радиус 5 и полином 3-й степени.

3.2. SEM-MLA.

Области, считающиеся репрезентативными для всего керна, были разрезаны и подготовлены на срезы толщиной 25×40 мм и дополнительно проанализированы с помощью сканирующей электронной микроскопии. Подготовка образца состояла из шлифования и

полировки поверхности образца. Это приводит к удалению небольшой части материала толщиной до 0,5 мм.

Количественные минералогические данные были собраны из каждого тонкого разреза с использованием автоматизированного подхода. Анализы проводились с использованием анализатора выделения минералов (MLA), оснащенного FEI Quanta 650 F field emission SEM (FEI, Хиллсборо, Орегон, США) с двумя энергодисперсионными рентгеновскими детекторами (EDX) Bruker Quantax X-Flash 5030 (Bruker, Биллерика, Массачусетс, США). Изображения с обратным рассеянием электронов (BSE) используются для определения зерен минерала. Изображения BSE представляют собой изображения в оттенках серого, на которых уровень оттенков серого колеблется в диапазоне 0-255 в соответствии со средним атомным номером (AAN) элементов, составляющих минерал/фазу. Более низкие значения AAN соответствуют более темному серому цвету и указывают на то, что минералы состоят из светлых элементов (в данном случае, например, кварца и силикатов). Более яркие оттенки серого, напротив, отражают более высокие значения AAN и указывают на минералы, состоящие из элементов с высоким атомным весом (например, самородное золото). Зерна минералов были выделены на основе уровня их оттенков серого на изображениях BSE, а затем идентифицированы путем выполнения рентгеновских измерений EDS на близко расположенной сетке. Условия эксплуатации, используемые для SEM и MLA, перечислены в таблице 2.

Табл. 2.

Параметры сбора данных SEM-MLA.

SEM Settings		MLA Settings	
Acceleration voltage (kV)	25	Pixel size (μm)	3
Probe current (nA)	10	Resolution (pixels)	1000 \times 1000
Spot size (μm)	5.6	Step size (pixels)	6 \times 6
Frame width (pixels)	1500	Acquisition time (ms)	5
Brightness	96.2	BSE trigger	26–255
Contrast	18.5	Minimum particle size (pixels)	3
BSE calibration (Au)	254	Minimum grain size (pixels)	3

Обработка данных проводилась с использованием программного пакета MLA Suite (версия 3.1.4.686, FEI, Хиллсборо, Орегон, США). Редактор ссылок на минералы использовался в онлайн-режиме для заполнения списка минералов, необходимого для классификации тестируемых образцов. Программное обеспечение для обработки изображений MLA использовалось для предварительной корректировки данных, такой как удаление краев кадра, и для дальнейших этапов обработки. Первый этап обработки состоит из спектральной классификации с порогом соответствия спектра 90% и низким порогом подсчета - 2000 отсчетов. Были использованы два сценария корректировки, чтобы назначить спектр стекла от пустот до фона и назначить минералы с размером зерен менее 4 мкм минералу-хозяину.

4. Методы.

Предлагаемая методология включает параллельный рабочий процесс, состоящий из картирования рудной минерализации с одной стороны и извлечения линейных объектов, в данном случае жил, с другой (рис. 3). Дополнительные инструменты используются для анализа конечных элементов, химического состава минералов и составления карт содержаний.

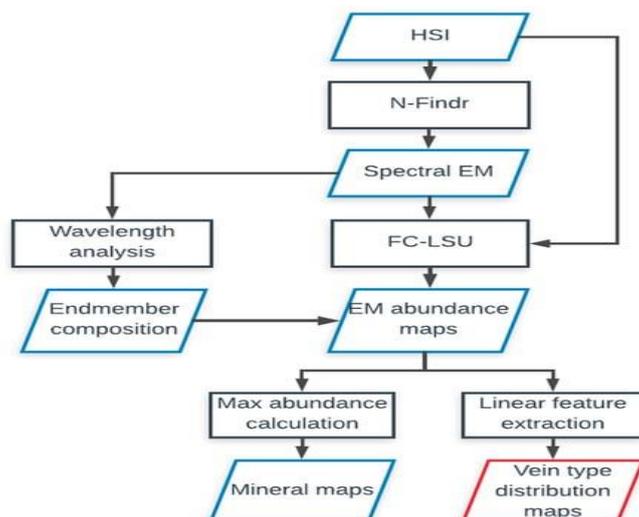


Рис. 3. Схематический рабочий процесс предлагаемой методологии (HSI = гиперспектральные изображения, EM = конечные элементы, FC-LSU = линейное спектральное разделение с полным ограничением).

4.1. Картирование рудной минерализации.

Первый этап предлагаемого метода состоит в извлечении конечных элементов. Было протестировано несколько алгоритмов извлечения конечных элементов. Среди всех протестированных методов алгоритм N-Findr показал наилучшие результаты с текущим набором данных и, таким образом, используется в данном исследовании. Этот метод предполагает, что N-объем, содержащийся в симплексе, образованном самыми чистыми пикселями в наборе данных, больше, чем любой другой потенциальный объем, сформированный из других выбранных комбинаций. Известно, что методы оценки виртуальной размерности используются для оценки соответствующего количества конечных элементов в гиперспектральных данных. Была предпринята попытка внедрить эти методы. Однако результаты показали большее количество конечных элементов, чем минералов, фактически присутствующих в соответствии с предыдущими знаниями об образцах (петрографические наблюдения и данные валидации). Выбор трех конечных элементов для каждой из отобранных буровых колонн оказывается целесообразным, учитывая вариабельность образцов. Затем спектры конечных элементов подвергаются анализу по длине волны в различных диапазонах, чтобы идентифицировать основные встречающиеся SWIR-активные минералы, такие как мусковит, минералы группы хлорита, гипс, биотит, флогопит,

амфиболы и карбонаты. Неактивные фазы SWIR, такие как некоторые породообразующие минералы (например, кварц, полевые шпаты, пироксены) или сульфиды, не могут быть идентифицированы с помощью используемых спектральных диапазонов. С целью определения жил со специфическими ореолами изменений, состоящими преимущественно из минералов, активных SWIR. Выбранные минералы идентифицируются на основе глубины их специфических характеристик поглощения. Расположение минимумов в выбранных спектральных диапазонах указывает на присутствие или отсутствие конкретного минерала, а также на относительные химические изменения в пределах конкретных групп минералов.

Полученные конечные элементы используются для «размешивания» при создании карт содержаний. Для этой цели используется метод полностью ограниченного линейного спектрального размешивания (FC-LSU), основанный на рассмотрении линейного вклада каждого минерала в пределах пикселя. Метод основан на гипотезе о том, что значимые дроби конечного элемента должны соответствовать двум ограничениям: они должны суммироваться до единицы и должны быть неотрицательными. Затем дробный вклад каждого конечного элемента вычисляется путем инверсии линейной модели. Как только карты численности конечных элементов получены, каждый пиксель классифицируется в соответствии с максимальной численностью конечных элементов.

4.2. Выделение жил.

Был разработан подход, основанный на детекторе криволинейных структур Стегера. Этот метод позволяет извлекать следы жил из карт залегания полезных ископаемых вместе с их истинными формами и протяженностью (рис. 4).

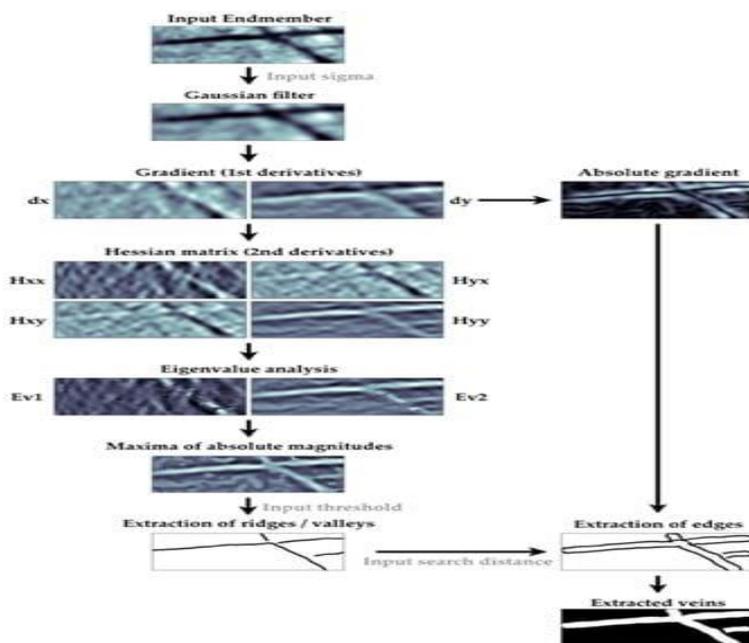


Рис. 4. Предлагаемый рабочий процесс для извлечения жил.

Первый этап процесса извлечения жил состоит в идентификации точек максимальной кривизны на изображении. Они соответствуют специфической сигнатуре минерала или минеральной ассоциации, связанной с составом жил или ореолом их изменений. Анализ кривизны изображения основан на собственных значениях матрицы Гессе. Матрица Гессеана 2×2 состоит из частных производных второго порядка входного изображения. Частные производные второго порядка определяются как свертка с производными фильтра Гаусса в масштабе σ . Анализ собственных значений позволяет выделить основные направления и величину, на которую может быть разложена локальная структура второго порядка изображения. Каждому пикселю присваивается набор собственных векторов, таких как $|\lambda_1| \leq |\lambda_2|$. Линейные объекты характеризуются очень малой величиной λ_1 (в идеале близкой к нулю) и большой величиной λ_2 . Точечные объекты будут показывать одинаковые величины λ_1 и λ_2 , а объекты без предпочтительных направлений или случайного изменения будут иметь низкие величины для обоих собственных векторов. Подход, разработан Штегером, и это позволяет идентифицировать точки максимальной кривизны на изображении. Затем эти точки соединяются в линии с использованием рекурсивного подхода. Каждая линия строится путем определения точки с максимальной второй производной, а затем путем добавления соответствующих соседей к текущей линии. Выбор подходящего соседа основывается на расстоянии, а также разности углов между точками. Процедура повторяется до тех пор, пока не останется точек с кривизной выше определенного порога. Этот порог введен, чтобы избежать выделения “слабых” объектов. Границы могут быть обнаружены с помощью абсолютного градиента, полученного из частных производных первого порядка. Сначала применяется фильтр Гаусса, чтобы удалить зашумленную составляющую изображения. Однако для получения наиболее точной локализации краевых точек используется минимально возможный масштаб ($\sigma = 3$). Для каждой пары точек извлеченной линии расположены ближайшие максимумы абсолютного градиента вдоль ортогональной линии определенной длины, чтобы выделить контуры жил. В случае, если вблизи пары точек не обнаружено пиковых значений, положение кромки интерполируется на основе допустимых кромок для предыдущей и последующих пар.

Этот подход высокочувствителен к масштабу фильтра Гаусса, используемого в первую очередь для выделения осевых следов жил. Чтобы решить эту проблему, процедура повторяется для ряда параметров, а затем результаты объединяются, обеспечивая обнаружение как тонких, так и толстых жил.

5. Результаты.

Потенциал и ограничения предлагаемого метода проиллюстрированы на трех образцах из болканской порфировой системы (DC-1, DC-2 и DC-3). Образцы содержат различные типы жил и типы сопровождающих изменений. Макроскопические наблюдения за фрагментами керна и данные SEM-MLA, полученные на полированных тонких срезах, используются в качестве основы для проверки достоверности данных.

5.1. Данные проверки.

Минералы, которые поглощают часть падающего света в диапазоне от 1000 до 2500 нм, далее называются минералами, активными для вихревого излучения. Активными минералами SWIR, выявленными в образцах, являются мусковит, хлориты, биотит, эпидоты, карбонаты и амфиболы. Сульфаты кальция присутствуют либо в виде гипса (активен SWIR), либо в виде ангидрита (неактивен SWIR). Карты минералов MLA используются для идентификации и подтверждения основных типов изменений и ассоциаций минералов, обнаруженных в образцах (рис. 5).

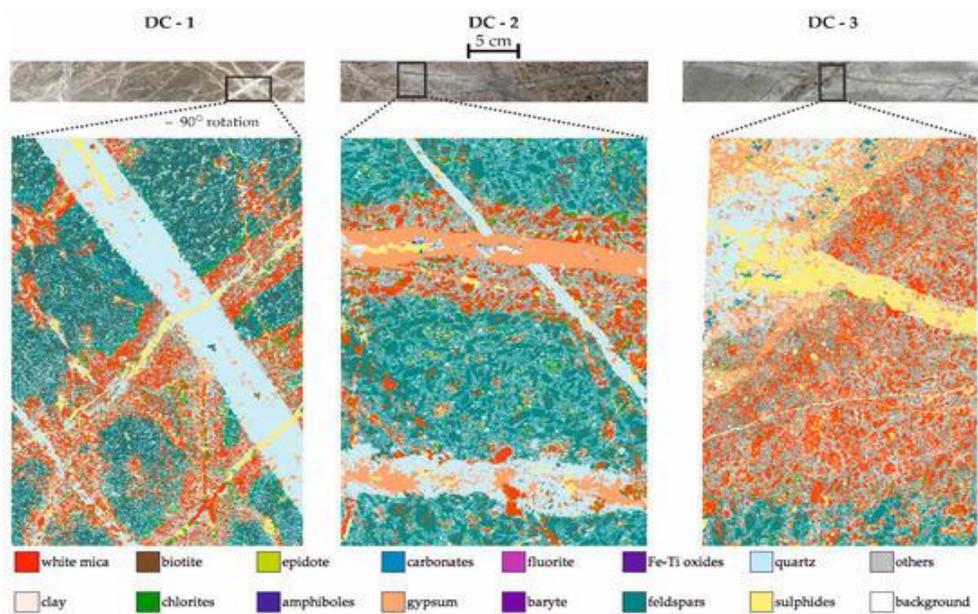


Рис. 5. Карты минералов SEM-MLA, используемые для проверки и оценки картирования полезных ископаемых на основе гиперспектральных сканирований.

Распределение активных и неактивных минералов SWIR показано на этих результатах. Ассоциация конкретных активных и неактивных минералов SWIR может помочь определить конкретную зону изменений. Таким образом, конкретные SWIR-активные комплексы могут быть дополнительно привязаны к определенному местоположению в порфировой системе. Основными типами изменений, обнаруженных в образцах, являются филлитовые (кварц–мусковит–пирит), калиевые (к-полевоый шпат–биотит) и кальциево-натриевые (плагиоклаз–хлорит/актинолит и подчиненный мусковит). Кроме того, отмечены переходы между этими

стилями изменений. Основными типами жил, присутствующими в образцах, являются жилы типа В, состоящие в основном из кварца или сульфата кальция с преобладанием сульфида в центральной линии, и поздние жилы типа D, состоящие в основном из сульфидов и в меньшей степени из сульфата кальция. Номенклатура стадии и морфологии жил соответствует описанию, предоставленному Густафсоном и Хантом.

Образец DC-1 отмечен повсеместными изменениями калия, характеризующимися присутствием К-полевых шпатов, биотита и незначительного хлорита. В этом образце присутствуют два основных типа жил. Жилы D-типа состоят из сульфидов и демонстрируют сильный ореол филлитовых изменений, вызванный поздней реакцией минерализующих гидротермальных флюидов с вмещающей породой. В-жилы состоят преимущественно из кварца с сульфидной или сульфидно-кальциевой осью (гипс или ангидрит).

Образец DC-2 показывает менее интенсивные изменения калия с переходом к натриево-кальциевым изменениям. Матрица состоит из полевых шпатов, хлорита и незначительных количеств биотита. Встречаются два основных типа жил. Это кварцевые В-жилы с осевой линией сульфидов и сульфата кальция и В-жилы сульфата кальция с осевой линией сульфидов и переходом к D-жилам. Сложность архитектуры жил может быть объяснена поздним вскрытием В и D жил. Эта система также объясняет образование ореола изменений с сильным филлитовым составом.

Образец DC-3 характеризуется натриево-филлитовой породной матрицей, содержащей два основных типа жил. Первый тип жилы – D с крупным ореолом изменений мусковита. Второй тип жил состоит преимущественно из кварца, сульфата кальция и сульфидов. Изменение симметрии и минеральной ассоциации в этих последних жилах указывают на повторное открытие первоначально присутствующей кварцевой или В-жилы.

5.2. Рудная минерализация.

В качестве первого этапа обработки гиперспектральных данных конечные элементы извлекаются с использованием алгоритма N-Findr. В настоящем исследовании рассматриваются три конечных элемента, поскольку они охватывают самую сильную изменчивость в минералогии изменений (рис. 6).

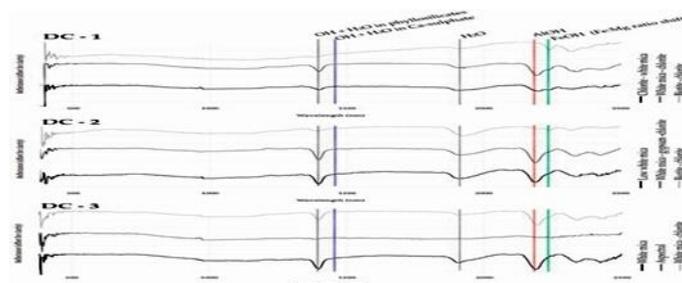


Рис. 6. Спектры VNIR-SWIR конечных элементов, извлеченные из трех сканирований ядра.

Анализ конечных элементов выполняется с использованием инструмента анализа длин волн на основе дерева решений для идентификации основных минералов, присутствующих в конечных элементах. Например, для мусковита выделяют три типа на основе положения минимальной длины волны в выбранных диапазонах: парагонитовую (2180-2195 нм), промежуточную (2195-2210 нм) и фенгитовую (2210-2228 нм).

После применения FC-LSU для оценки обилия получают окончательные карты рудной минерализации с использованием максимального обилия среди трех конечных элементов в каждом пикселе. Обратите внимание, что в FC-LSU содержание конечных элементов равно единице (рис. 7).

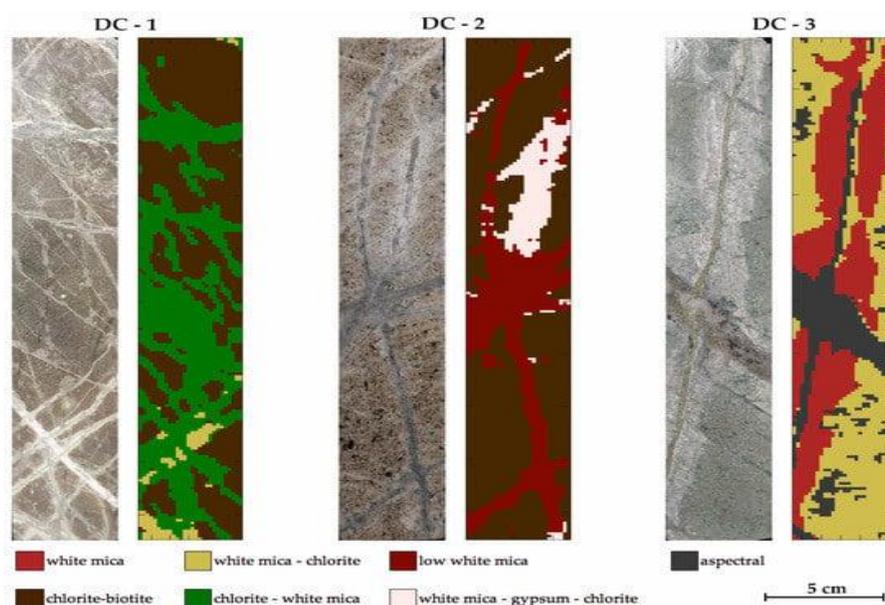


Рис. 7. RGB-изображение образцов керна и карт минералов, полученных с помощью N-Findr, FC-LSU, и картирование максимального содержания с использованием 3 конечных элементов.

Основными спектрально активными соединениями, наблюдаемыми в образце DC-1, являются хлорит–мусковит, мусковит–хлорит и хлорит-биотит. Первые два представляют собой участки изменения вокруг основных типов жил, в то время как последний комплекс доминирует в матрице породы. В образце DC-2 основными ассоциациями изменений, связанных с жилой, являются мусковит и мусковит–гипс-хлорит. Матрица в образце DC-2, как и в образце DC-1, характеризуется преобладанием хлорита и биотита среди SWIR-активных минералов. В образце DC-3 нанесен на карту спектральный конечный элемент, соответствующий залеганию сульфида и кварца. В измененной окраске этих жил преобладает мусковит, тогда как повсеместное изменение состоит в основном из сочетания мусковита и хлорита.

Образец DC-1 содержит два конечных элемента, содержащих мусковит. В конечном элементе из мусковита и хлорита мусковит имеет промежуточный состав, в то время как в

слюде из хлорита и мусковита она имеет фенгитовый состав. Концевой элемент мусковита с низкой интенсивностью поглощения (называемый низким мусковитом) в образце DC-2 имеет парагонитовый состав по сравнению с концевым элементом мусковит–гипс-хлорит, где мусковит имеет промежуточный характер. Образец DC-3 показывает обратную зависимость между составом слюд в жилах и в матрице по сравнению с образцом DC-1. Конечный элемент, характеризующий матрицу, здесь имеет фенгитовый состав, в то время как кромка жилы - парагонитовый. Эти результаты были подтверждены картами минимальных длин волн в диапазонах 2180-2228 нм для мусковита и 2240-2263 нм для хлорита.

5.3. Выявление структурных особенностей.

Выделение структурных особенностей выполняется на каждой из карт содержания конечного элемента, полученных FC-LSU (рис. 8). Для каждого из образцов концевые элементы 1 и 2 соответствуют измененной кромке жилы или внутреннему составу жилы, в то время как концевой элемент 3 отражает повсеместные изменения.

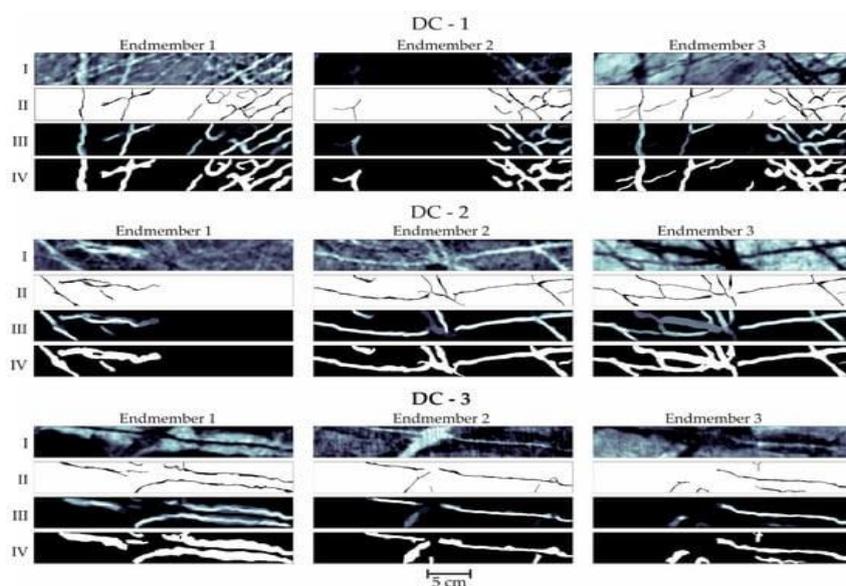


Рис. 8. Результаты извлечения жил, выполненные на картах обилия endmember, полученных FC-LSU. I = карта обилия конечного элемента, II = извлеченные гребни для сигм в диапазоне от 3 до 10 и пороговые значения в диапазоне от 98% до 92%, III = перекрывающиеся полигоны после соединения извлеченных линий с их соответствующими краями (объекты, обнаруженные с более широким диапазоном сигм, становятся ярче), IV = извлеченные жилы после объединения всех полигонов.

В образце DC-1 присутствует комбинация двух типов жил. На одном из конечных элементов видна граница изменения, в которой преобладает мусковит, а на другом - граница, в которой преобладает хлорит. Однако местами, из-за повторного вскрытия жил и сложности состава, содержание конечных элементов, а также извлеченные векторы показывают частичное перекрытие двух конечных элементов, связанных с жилами. Это особенно заметно в левой части образца.

Для образца DC-2 результаты картирования минералов и извлечения жил показывают хорошее совпадение с точки зрения картирования минералогии жил. Для DC-1 достигнута хорошая производительность экстракции, соответствующая макроскопическим наблюдениям и данным валидации. Более того, артефакты, обнаруженные при картировании минерализации вблизи жил второго типа, здесь отсутствуют. Кроме того, проводится различие между толстой субгоризонтальной жилой в верхней части изображения и пересекающейся наклонной жилой, что было невозможно на картах минерализации. Для DC-2 из-за низкой интенсивности на карте содержаний DC-3, присутствующая и нанесенная на карту в центре изображения, здесь не выделяется с выбранными параметрами. Тем не менее, с уменьшением сигма-значения или пороговых диапазонов было возможно выделить эту жилу. Однако недостатком уменьшения сигма-значения или минимального порога был бы риск отображения шума как жил.

Образец DC-3 был выбран в качестве примера с исключительно толстыми полосами изменений, превышающими один сантиметр в ширину. D-жилка, присутствующая в этом образце, демонстрирует особенно широкий ореол изменений, сходный по составу с кварц-ангидрит-сульфидной жилой. Расширение диапазонов для параметра σ по-прежнему не позволит точно выделить эту жилу. Здесь использование конечного элемента 1, соответствующего ореолу изменения обеих жил, приводит к выделению двух объектов, параллельных D-жиле. Выделение жил из карты содержаний DC-2, охарактеризованной как спектральная, приводит к обнаружению структурных особенностей, характерных для внутреннего состава обеих жил.

Для всех трех образцов эндемик 3 характерен для повсеместных изменений. Извлечение жил должно позволять картировать все жилы на основе областей с минимальным содержанием эндемика 3. Для образцов DC-1 и DC-2 результаты показывают наложение типов жил, нанесенных на карту с первых двух конечных элементов. Исключения встречаются, в частности, для образца DC-2, где некоторые жилы очень тонкие, а ореол изменений имеет низкую интенсивность по сравнению с матрицей и в связи с изменчивостью состава изменений. Ожидаемая толщина извлекаемой жилы оценивается в 0,5 мм. Однако это значение может варьироваться, поскольку эффективность метода сильно зависит от содержания активных фаз SWIR в жилах или ореолах изменения жил. В зависимости от местоположения в системе, а также стадии минерализации, контраст между содержанием активных фаз SWIR внутри жил и вблизи них по сравнению с матрицей варьируется.

Тот же подход можно использовать для других входных файлов, таких как изображения, полученные в результате математического расчета полосы или анализа минимальной длины волны. Математические расчеты полос (2170/2206 нм), характерные для распределения

мусковита в исследованных образцах, выполнены на спектрах, удаленных от континуума. Поскольку здесь рассматривается только мусковит промежуточного состава, результаты извлечения жилок не будут полностью соответствовать распределению всех типов мусковита, показанных на конечных картах содержаний.

Используя осевую линию извлеченных объектов, можно оценить азимут различных типов жил в каждом из конечных элементов (рис. 9).

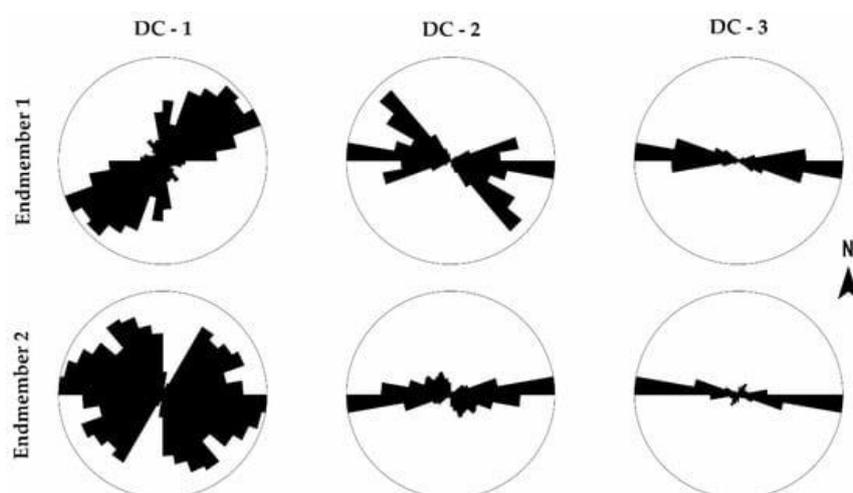


Рис. 9. Роздиаграммы, иллюстрирующие ориентацию жил в первых двух концевых элементах каждого образца. Азимут рассчитан на основе горизонтального (E–W) расположения кернов,

Горизонтальная ориентация кернов, как показано на рисунке 8, рассматривается в качестве иллюстрации. Для интеграции данных в 3D-модель следует учитывать ориентацию буровой скважины. Ориентация и обилие жил сильно различаются в трех протестированных образцах керна, особенно в образцах DC-1 и DC-2, которые были взяты из одной и той же скважины на разной глубине. Кроме того, также может наблюдаться совпадение ориентации жил, выявленных в двух концевых элементах, связанных с жилами. В образце DC-2 наложение двух ориентаций в основном вызвано сходным доминирующим азимутом между двумя основными типами жил. Однако в образце DC-3 перекрытие происходит из-за извлечения внутреннего состава жилы из первого концевого элемента и извлечения ореола изменения жилы из второго концевого элемента.

Содержание каждого типа жил определяется количественно на основе процента поверхности в образцах (табл. 3). Для образцов DC-1 и DC-2 концевые элементы 1 и 2 являются репрезентативными для определенных типов жил. Для образца DC-3 конечный элемент 1 является репрезентативным для ореола изменений, тогда как конечный элемент 2 характерен для внутреннего состава жил, который является спектральным и состоит преимущественно из сульфидов. Конечный элемент 3 для образцов DC-1 и DC-2 относится к матрице породы, поэтому путем картирования минимального содержания на изображении (темная фаза)

извлекается общее количество жил со значительной толщиной или отчетливым ореолом изменений. Из-за большой толщины ореола изменений D-жилы в образце DC-3, в основном характерного для всепроникающих изменений, края ореола изменений и небольшое присутствие хлорита с сульфидом в жиле выделяются в виде линейных структур.

Табл. 3.

Краткое изложение результатов извлечения жил
(EM = конечный элемент, BR = соотношение полос).

Sample	Input	Mineralogy	Distribution	Extracted Feature	Estimated Surface Abundance (%)
DC-1	EM 1	Chlorite–white mica	Vein halo	Bright	22
	EM 2	White mica–chlorite	Vein halo	Bright	14
	EM 3	Biotite–chlorite	Matrix	Dark	23
	BR	White mica	Vein halo	Bright	18
DC-2	EM 1	White mica–gypsum–chlorite	Vein halo	Bright	13
	EM 2	Low white mica	Vein halo	Bright	23
	EM 3	Chlorite–biotite	Matrix	Dark	30
	BR	White mica	Vein halo	Bright	26
DC-3	EM 1	White mica	Vein halo	Bright	33
	EM 2	Aspectral	Vein halo	Bright	13
	EM 3	White mica–chlorite	Matrix	Bright	11
	BR	White mica	Vein halo	Dark	145

Расчетная плотность представлена процентом поверхности, покрытой определенным типом жил, выделенным на входном изображении; для выделенных объектов яркий цвет указывает на высокую распространенность, в то время как темный - на низкую.

Структурные особенности, извлеченные из изображений, полученных по соотношению полос, характерны для обилия мусковита. Из-за расположения образцов в калийной и натриево-кальциевой зонах системы филлитовых изменений в основном связаны с ореолами жил.

6. Проверка результатов.

Карты рудной минерализации MLA могут использоваться для локальной проверки результатов обработки гиперспектральных данных. В качестве первого шага проиллюстрированы изображения RGB, карты максимального содержания минералов на основе HSI и карты распределения жил вместе с обозначениями местоположения тонких срезов, проанализированных MLA, на изображениях RGB (рис. 10). Для дальнейшего анализа карты минералов MLA, оцифрованные упрощенные карты MLA, карты максимального содержания на основе HSI и карты распределения жил представлены вместе в поле зрения тонкого разреза (рис. 11). Для большинства образцов наблюдается небольшое, но последовательное смещение между картами MLA и HSI-картами жил. Это смещение вызвано ориентацией (провалом) жилы, поскольку во время подготовки образца теряется около 0,5 мм материала между анализируемой поверхностью керна и поверхностью тонкого среза. Поскольку большинство типов жил являются вертикальными и субвертикальными по

отношению к поверхности образца, наличие небольшого смещения в местоположении жилы обычно составляет 1 мм или меньше, и это не оказывает сильного влияния на процедуру валидации классификации гиперспектральных данных.

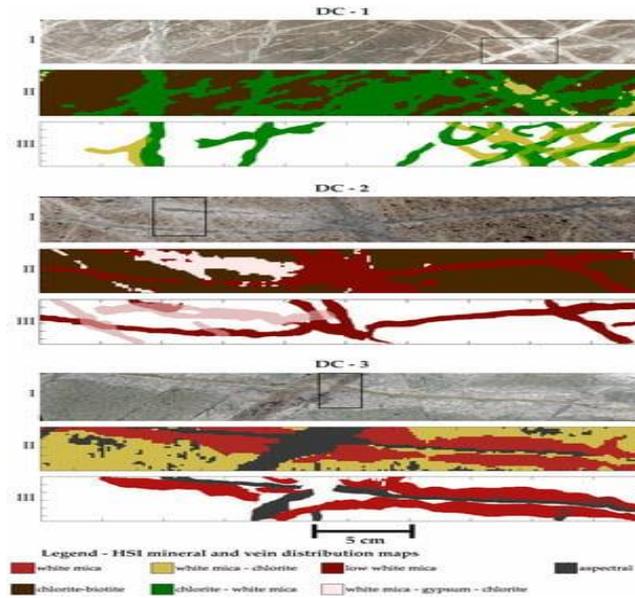


Рис. 10. Иллюстративная схема проверки данных для каждого из трех образцов. I = RGB-изображение ядра с отмеченной областью расположения карты минералов SEM-MLA, II = карта максимального содержания минералов на основе HSI, III = карты распределения жил.

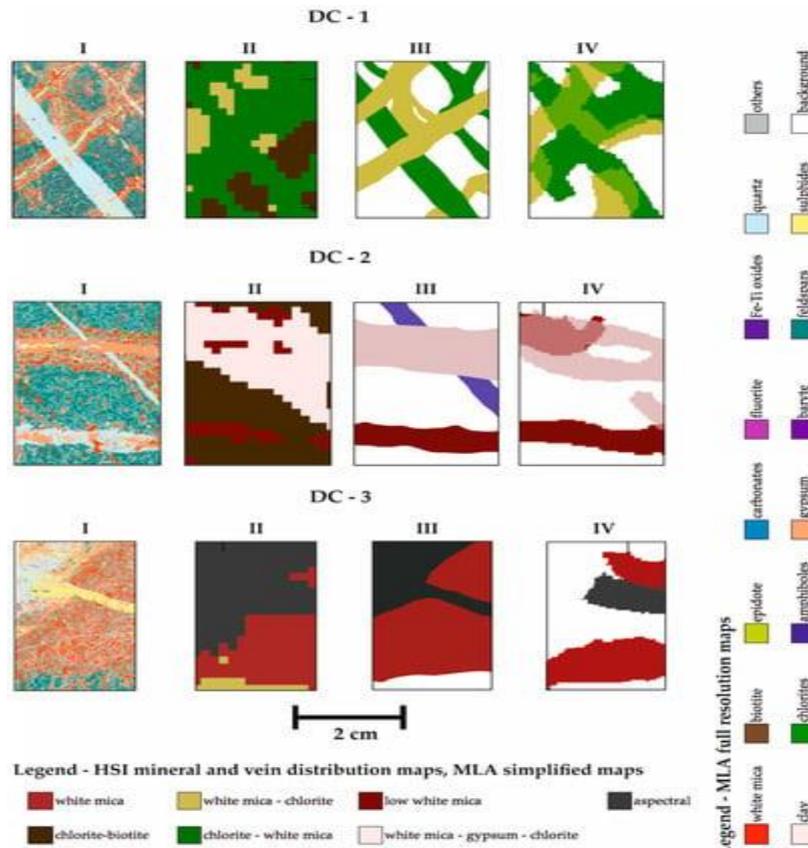


Рис. 11. Сравнение анализов на основе SEM-MLA и HSI: I-карта минералов на основе SEM—MLA в полном разрешении, II-карта максимального содержания минералов на основе HSI, III—оцифрованная карта SEM-MLA с выделением основных типов жил, IV—карта распределения жил на основе HSI.

Для трех исследованных образцов оценка SWIR-активной минералогии согласуется с основными минералами, идентифицированными MLA, включая мусковит, хлориты, биотит и сульфат кальция, описанный здесь как гипс. Присутствие сульфата кальция на некоторых картах MLA и отсутствие гипса на картах полезных ископаемых предполагают наличие вихревоактивного ангидрита, а не вихревоактивного гипса.

На основе обилия различных жил в каждом образце были выбраны и отмечены на упрощенных картах жил MLA несколько особенностей для оценки эффективности извлечения жил (рис. 12). В образце DC-1 были отобраны пять жил, в образце DC-2 - три, а в образце DC-3 - три признака, характерные либо для жилы, либо для венозных ореолов.

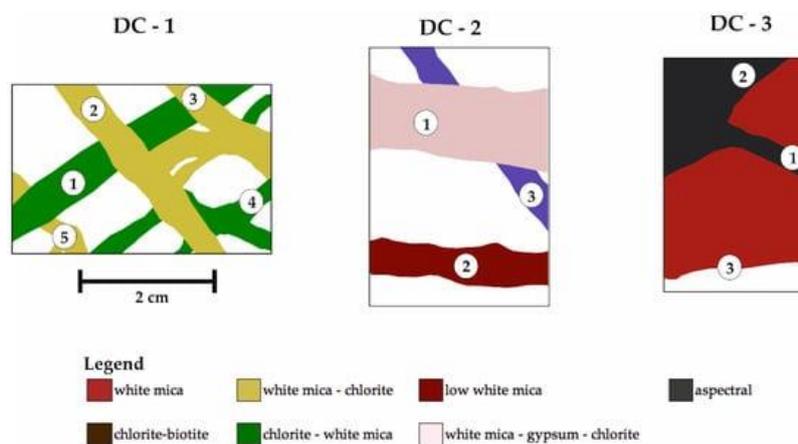


Рис. 12. Упрощенные карты минералов MLA с маркерами на объектах для проверки ширины жил и азимута.

Большинство отмеченных особенностей в образце DC-1 показывают хорошее соответствие между данными, полученными с помощью MLA, и извлеченными структурными особенностями. Однако области, где две жилы пересекают друг друга, вызывают перекрытия и сдвиги между извлеченными элементами. Аналогично в образце DC-2, где элементы 1 и 2 хорошо извлечены. Тем не менее, одна из жил, описанных на карте MLA (выделена фиолетовым цветом), на карте распределения жил на основе HSI идентифицируется не как отдельная, а как смесь или перекрытие двух типов жил. Причиной этого является небольшая ширина жилы по отношению к пространственному разрешению гиперспектральной камеры (1,5 мм/пиксель), а также ее состав, промежуточный между двумя основными жилами, которые были извлечены. В образце DC-3 наблюдается относительно хорошее выделение элемента 1, характерного для сульфидной жилы, а также хорошее перекрытие протяженности ореола ее изменения (признак 3). С другой стороны, более толстая спектральная жила (признак 2) плохо выделялась из данных HSI.

Для численной оценки производительности инструмента для извлечения жил используются карты распределения жил и оцифрованные упрощенные карты MLA. Для этой

цели, по возможности, анализируется точность ориентации и толщины каждого выбранного элемента (табл. 4). Элементы 2 и 3 в образце DC-3 не удалось оценить с точки зрения толщины и ориентации из-за их неполного отражения на карте минералов MLA.

Табл. 4.

Результаты валидации извлечения жил для выбранных объектов.

Feature	DC-1		DC-2		DC-3	
	Azimuth Deviation (°)	Width Accuracy (%)	Azimuth Deviation (°)	Width Accuracy (%)	Azimuth Deviation (°)	Width Accuracy (%)
F1	1.3	91	4	82	4.5	75
F2	4	95	0.5	90	-	-
F3	3.7	93	0.5	92	-	-
F4	0.2	67	-	-	-	-
F5	2.5	65	-	-	-	-

Ориентация анализируется с использованием среднего угла расположения жил на разных центральных сегментах. Средняя толщина, рассчитанная на пересечении перекрытий, используется для оценки толщины жил. При анализе жил на основе HSI и MLA наблюдалось отклонение от азимута до 4,5° при ориентации жил. Что касается извлеченной толщины, то точность варьировалась от 65% до 95%, при среднем значении 81% при рассмотрении всех жил и 85% при рассмотрении только жил толщиной, превышающей пространственное разрешение используемого гиперспектрального датчика.

7. Обсуждение.

Предлагаемый рабочий процесс обработки гиперспектральных сканирований ядра VNIR-SWIR состоит из последовательности извлечения конечных элементов, спектрального размешивания, картирования минералов и методов извлечения жил. Рабочий процесс используется для разработки карт минерализации; затем набор инструментов геоморфологического анализа может быть использован для извлечения распределения и архитектуры жил из изображений содержаний конечных элементов и соотношения полос.

Картирование жил, количественная оценка их распределения и понимание зависимости между комплексом изменений, окружающих жилы разных типов, необходимы для картирования и оценки залежей типа штокверка, таких как залежи типа медного порфира. Показано, что предлагаемая методология дает представление об изменчивости типа жил, распределении и количественной оценке в отобранных образцах. Эта методология потенциально может предоставлять быструю и непредвзятую информацию о количественном составе жил, которая может стать ценным инструментом для текущего геологоразведочного

проекта, позволяя быстро оценить распределение и обилие связанных с жилами и широко распространяющихся комплексов изменений.

Визуальный анализ лотков керн из изучаемого порфира показал, что в ядре системы степень минералогических изменений в одном лотке керн аналогична той, которая наблюдается и анализируется в масштабе образца керн. В результате реализация предлагаемого метода в масштабе лотка с керном (рис. 2) была бы уместна для обеспечения быстрой оценки основных жил и типов изменений. Несмотря на то, что три конечных элемента предоставляют четкие карты содержания как для картирования полезных ископаемых, так и для извлечения жил, возникает необходимость в дополнительной информации о составе измененных минералов. Обычно в масштабе месторождения наблюдается общая зональность состава мусковита и хлорита; однако в случае месторождений порфира эта зональность также может наблюдаться в масштабе керн. Как мусковит, так и хлорит, как правило, присутствуют в образце в различных количествах, но их состав сильно зависит от близости к различным типам жил. В образцах DC-1 и DC-2 слюда имеет более фенгитовый состав, а хлориты имеют довольно высокое соотношение Fe: Mg вблизи жил, в то время как в образце DC-3 наблюдается обратная зависимость. Хотя местоположение минимумов поглощения белой слюды, вероятно, смещено в сторону более высоких длин волн при изобилии хлорита, в спектрах SEM наблюдалась сильная неоднородность химического состава мусковита. Зависимость химического состава мусковита и хлорита от стадии минерализации или состава распространяющихся изменений еще предстоит изучить.

При извлечении жил результаты кажутся многообещающими как с точки зрения толщины жил, так и с точки зрения оценки ориентации, учитывая высокую степень автоматизации метода. Используя различные значения сигма-фильтра для каждого образца, можно добиться более контролируемого извлечения жил. Однако использование пороговых значений толщины жил затруднено, когда ореол изменений вокруг жил демонстрирует диффузный характер и постепенный переход в (менее измененную) вмещающую породу. В таких случаях выбор порогового значения остается довольно субъективным. Кроме того, в матрицу также могут быть включены элементы, которые представляют не жилы, а скопления.

Из-за сложности выбора количества конечных элементов в промышленном масштабе выделение жил также может быть достигнуто на картах с минимальной длиной волны или изображениях с соотношением полос, характерных для конкретного минерала или минеральных комплексов, таких как гидратированный сульфат кальция в любой зоне повсеместного изменения, мусковит в зонах калийных и натриево-кальциевых изменений или хлорит в филлической зоне. Извлечение этих признаков на основе высокого содержания может

привести к составлению карты выбранных жил. Положительные результаты для этой цели были очевидны для образца DC-1, где некоторые из более тонких жил, которые не были выделены на картах обилия конечных элементов, были распознаны на изображении с соотношением полос, иллюстрирующем обилие мусковита. Другим подходом могло бы быть картирование низкого содержания гидратированных фаз с использованием плотности водного объекта около 1400 нм или 1900 нм. Таким образом, были бы выделены широкие сульфидные жилы, представляющие собой ореол изменений. Подобный пример можно также увидеть для соотношения полос для образца DC-3, где добываются сульфидные и сульфидно-кварцевые жилы.

8. Выводы.

В этом исследовании представлена новая методология извлечения и дополнения минералогических и структурных характеристик при гиперспектральном сканировании керна. Рабочий процесс состоит из трех основных этапов: (1) извлечение конечных элементов и спектральное разделение, за которым следует (2) картирование минерализации и (3) извлечение жил. Алгоритм N-Findr используется при гиперспектральном сканировании для выделения потенциальных конечных элементов. Затем выполняется линейное спектральное разделение с полным ограничением для получения карт содержания рудной минерализации. Эти карты в дальнейшем используются для картирования путем анализа максимального содержания в каждом пикселе. Наконец, потенциальные жилы идентифицируются на картах содержаний с использованием подхода, основанного на детекторе криволинейных объектов Steger, который сочетает в себе обнаружение гребней и краев. Этот подход позволяет выделять жилы в виде векторизованных линий или полигонов. Предлагаемая методология демонстрирует очень хорошую производительность в отношении:

- выявление минералогии гидротермально-метасоматических изменений жильных комплексов, с помощью карт содержаний минералов и карт распределения жил;
- картирование различных типов жил на основе ореолов их изменений или внутреннего состава, когда минералы, такие как гипс или карбонаты, являются частью жилы;
- оценка плотности жил на основе их распространения;
- оценка ориентации (азимута) различных типов жил;
- степень автоматизации по сравнению с существующими методами;
- высокий потенциал интеграции композиционных и числовых данных в 3D-модель поисково-разведочных проектов.

Существует тесная связь между производительностью инструмента для извлечения жил, выбранным количеством конечных элементов и производительностью алгоритма извлечения конечных элементов. С увеличением выбранного количества конечных элементов минералогические различия в образцах достигают более высокого разрешения. Однако это приведет к получению карт изобилия с пониженной четкостью и, следовательно, негативно повлияет на производительность алгоритма извлечения жил. Необходима дальнейшая работа по разработке алгоритмов оценки виртуальной размерности данных и, следовательно, согласованного количества конечных элементов.

III. ГЕОХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОЧВЫ ПРИ ПОИСКАХ «СКРЫТОГО» ОРУДЕНЕНИЯ (*Северный Китай*) [2].

1. Введение.

Глинистые минералы почвы являются идеальными переносчиками активных металлических элементов. В почве в больших количествах присутствуют оксиды железа и марганца. По мере уменьшения размера частиц почвы удельная поверхность оксидов железа и марганца увеличивается экспоненциально, а их способность адсорбировать активные металлические элементы возрастает. Мелкозернистые вещества в почве являются естественными “колодцами-ловушками” для активных элементов. Метод анализа почвы разделяет мелкозернистые компоненты, обогащенные активными металлическими элементами и позволяет выявлять скрытые рудные тела. По сравнению с другими геохимическими методами, метод анализа мелкозернистых почв проще использовать при отборе проб в полевых условиях и лабораторном анализе.

В этом материале приведены результаты исследований на трех типичных закрытых территориях - зона пустыни Гоби, зона лугопастбищных угодий и зона аллювиальных отложений на севере Китая (рис. 1).



Рис. 1. Покрытые территории Китая и расположение месторождений.

2. Материалы и методы.

2.1. Геологические условия.

Месторождение *Хуаньюшань* в засушливой местности, покрытой пустыней Гоби расположено на северо-западе Китая, между 40° и 50° северной широты, занимая общую площадь около $1\,435\,000\text{ км}^2$. Оно относится к палеоазиатской металлогенической области, объединяющей три полиметаллические зоны: Тяньшань, Бэйшань и Цилян. Выбранным эталоном является свинцово-цинковый рудник *Хуаньюшань*, расположенный в 91 км к северо-

западу от уезда Анси провинции Ганьсу, на среднем западе орогенного пояса Бэйшань. Геотектонически он находится в раннепалеозойском рифте Шуаньиншань на северной окраине блока Дуньхуан Таримской палеоземы. Обнаженный пласт в районе добычи представляет собой синьскую группу - набор метаморфических пород, в основном состоящих из мрамора, филлитов и сланцев, а четвертичный покров - аллювиальный гравий и песчанистая глина. Магматическая активность в основном проявляясь в виде крупномасштабных вторжений индосинского сиенита, монцонитового гранита и мелкозернистого порфирированного гранита.

Месторождение Чжунсуйцзихуа расположено в полусасушливой местности, покрытой лугами в восточной части Внутренней Монголии, к северу от гор Иньшань и к западу от гор Большой Хинган, занимая площадь около 323 900 км². Выбранным эталоном является медно-молибденовое месторождение Чжунсуйцзихуа, к северо-западу от Сонид Зуоци. Он расположен в позднепалеозойском континентальном пограничном аккреционном поясе юго-восточной континентальной окраины Сибирской плиты и принадлежит позднепалеозойско-мезозойскому металлогеническому поясу Эрлян-Дунвуки. Коренные, обнаженные пласты представляют собой обломочные породы каменноугольно-пермского периода, а покровные - склоновые отложения голоцена. Каменноугольно-пермские пласты в основном представляют собой метаморфический полевошпатовый кварцевый песчаник и алевритовый сланец. Четвертичный слой состоит в основном из глины, песка и гравия, в некоторых местах встречаются эоловые пески. Обнаженные магматические породы в исследуемом районе в основном представляют собой варисканские гранодиориты, тесно связанные с минерализацией Cu и Mo.

Месторождение Цюцзя в местности, покрытой аллювиальными осадками, расположено в средней части золоторудного металлогенического пояса Цзяоцзя. Оно связано с зоной разлома Цзяоцзя северо-восточного направления, где выявлено большое количество вторичных разломов, участков трещин и зон минерализованных изменений. Под четвертичным чехлом находятся яньшанские монцонитовые граниты Цуйчжао - Линглонг и порфирированный позднеяньшанский гранодиорит Гоцзялин.

2.2. Отбор проб и анализ.

Вдоль 26 разведочных профилей свинцово-цинкового м-ния Хуаньюшань были отобраны почвенные пробы через 50 м, глубина отбора 10-30 см. Образцы мелкой фракции почвы (<76 мкм), состоящие из 3-5 подвыборок в радиусе 5 м вокруг точки отбора проб, были проанализированы на свинец, цинк и др. элементы методом плазменной масс-спектрометрии (ICP-MS). Предел обнаружения составлял 2 ppm, а уровень отчетности - 100%. Уровень

соответствия стандартных эталонных материалов и чистых образцов составил 100%, а дублирующих образцов - 98% (рис. 2).

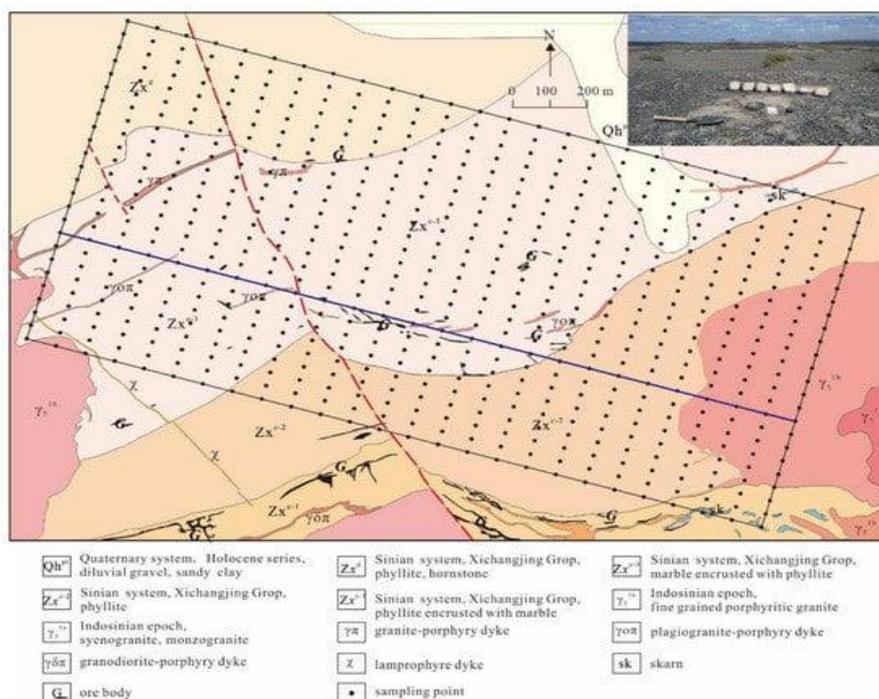


Рис. 2. Геологическая карта и места отбора проб на Pb-Zn м-нии Хуаньюшань.

Вдоль 11 разведочных линий медно-молибденового м-ния Чжунсуйцихуа был произведен отбор проб через 80 м на глубине 5-30 см. Образцы мелкой фракции почвы (<76 мкм), состоящие из 3-5 подвыборок на расстоянии 5 м вокруг точки отбора проб, были проанализированы на медь, молибден и др. методом плазменной масс-спектрометрии (ICP-MS) с отчетностью 100%. Предел обнаружения Cu составлял 1 ppm, а Mo - 0,2 ppm. Уровень соответствия стандартным эталонным материалам, пустым образцам и дублирующим образцам составил 100% (рис. 3).

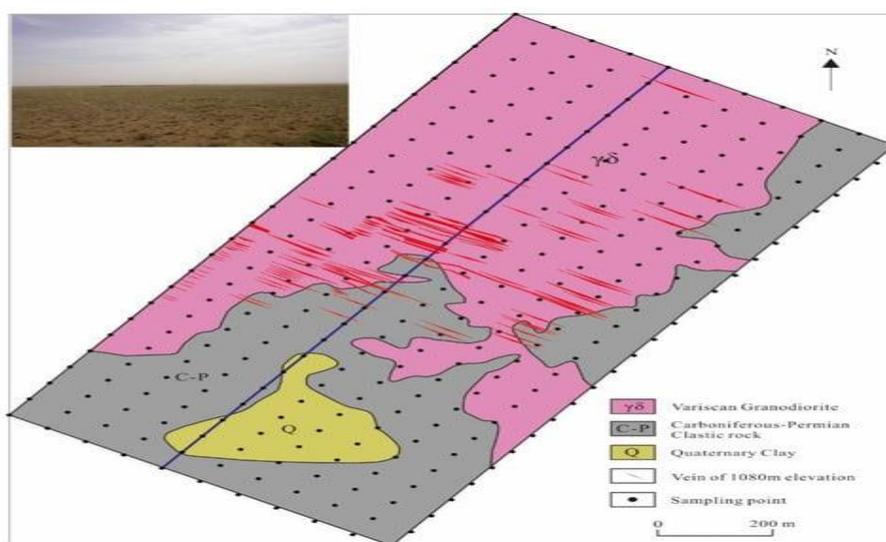


Рис. 3. Геологическая карта и места отбора проб на Cu-Mo м-нии Чжунсуйцихуа.

Образцы мелкой фракции почвы (<125 мкм), состоящие из 3-5 подвыборок в радиусе 5 м от точки отбора проб, были отобраны вдоль 9 разведочных линий через 80 м на *м-нии Цюйцзя*. Золото, серебро и др. элементы были проанализированы методом беспламенной атомно-абсорбционной спектроскопии (ААН) с пределом обнаружения 0,2 ppb, а Ag анализировали методом плазменной масс-спектрометрии (ICP-MS) с пределом обнаружения 20 ppb. Уровень отчетности составил 100%. Уровень соответствия стандартным эталонным материалам и пустым образцам составил 100%, а уровень соответствия дублирующимся образцам - 97,4% (рис. 4).

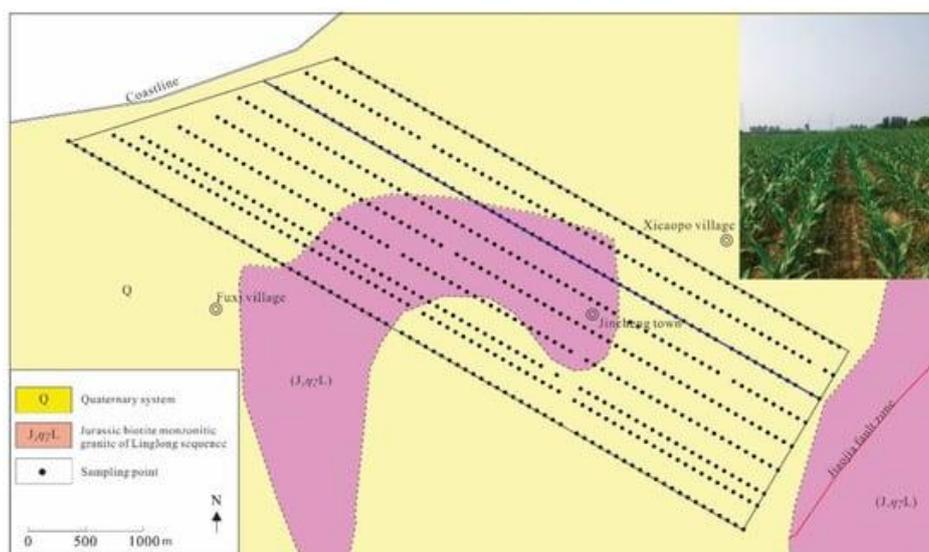


Рис. 4. Геологическая карта и места отбора проб на *м-нии Цюйцзя*.

3. Результаты.

3.1. Исследования *м-нии Хуаньюшань*.

Основным орудением на *м-нии Хуаньюшань* являются Pb и Zn. Содержание Pb в мелкозернистых почвах колеблется между 52,7 и 7806,6 ppb, при среднем значении 406,4 ppb и 779,5 ppb, что значительно выше, чем в пустыне Гоби (среднее значение 14,1 ppb и среднее значение 15,5 ppb). Содержание Zn колеблется между 86,1 и 5807,4 ppb, при среднем значении 300,9 ppb и 525,5 ppb, что также значительно выше, чем в пустыне Гоби (среднее значение 45,2 ppb и 49,7 ppb).

Проверка размера частиц на *м-нии Хуаньюшань* показывает, что содержание элементов в мелкозернистых образцах значительно выше, чем в крупнозернистых (рис. 5). В более мелкозернистой фракции почвы содержание Pb составляет 5066 ppb во фракциях 120-150 мкм, 4879 ppb в фракциях 76-120 мкм и 4432 ppb во фракциях <76 мкм соответственно. Содержание Pb в более крупной фракции составляет 1295 ppb во фракциях 840-4800 мкм и 1529 ppb во фракциях 380-840 мкм соответственно. В совокупности содержание Pb в мелкой фракции

выше, чем в крупной фракции. Zn, Ag и Au также демонстрируют схожую картину. В частности, содержание Pb, Zn, Ag и Au в мелкозернистой почве примерно в 3,40, 4,45, 3,97 и 1,78 раза выше, чем в крупнозернистой почве, соответственно. Эти результаты показывают, что мелкозернистая почва является хорошей средой для отбора проб для геохимических исследований в пустыне Гоби.

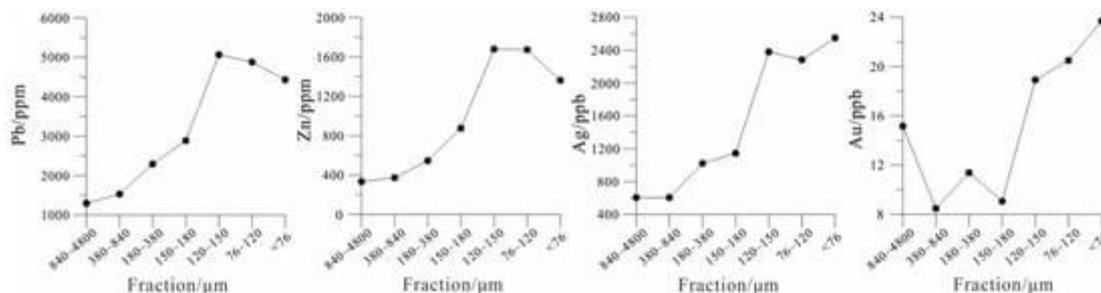


Рис. 5. Линейные диаграммы Pb, Zn, Ag и Au в почвенных фракциях разного размера на Хуаньюшань.

Линейная диаграмма содержания Pb и Zn в мелкой фракции почвы (<76 мкм) поперек скрытой минерализованной зоны (линия съемки отмечена синей линией на рис. 2) показана на рисунке 6. Образец № 17 (800 м) над рудным телом содержит самое высокое содержание Pb, 11 637 ppm, что примерно в 40 раз превышает содержание Pb в фоновой зоне (около 300 ppm в образцах № 1-4 и № 20-26). Второе по величине содержание Pb составляет 6891 ppm (образец № 12), которое также обнаружилось выше рудного тела (550 м) и примерно в 20 раз превышает фоновое содержание. Аналогичным образом, другие высокие значения содержания Pb также наблюдаются над рудным телом. Аналогичное распределение наблюдается и для Zn. Эти результаты демонстрируют, что использование мелкозернистой фракции почвы может указывать на минерализацию Pb и Zn в пустыне Гоби.

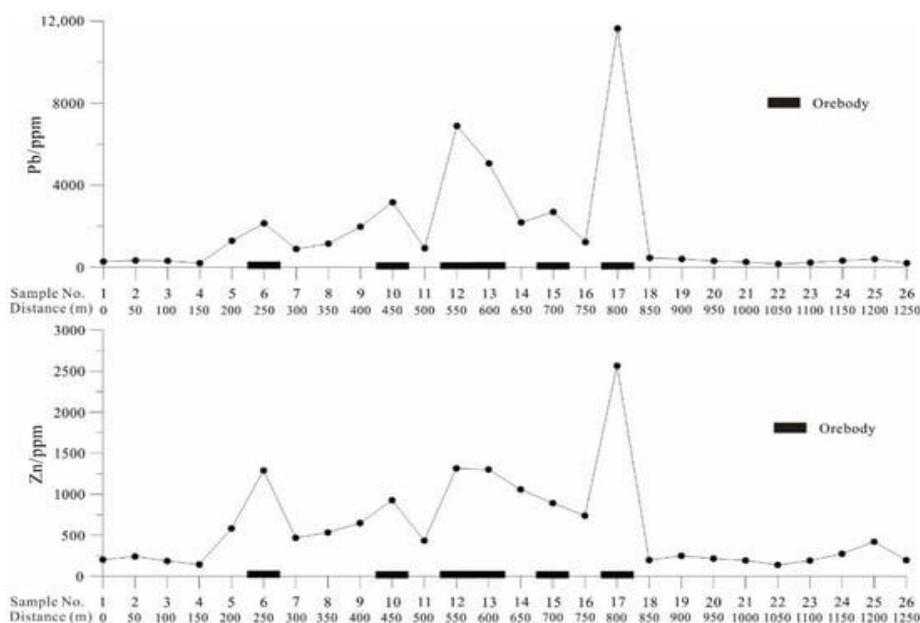


Рис. 6. Линейные диаграммы Pb и Zn образцов мелкозернистого грунта (<76 мкм) в скрытом рудном теле.

Результаты площадных измерений мелкозернистого грунта свинцово-цинкового м-ния Хуаньюшань показаны на рисунке 7.

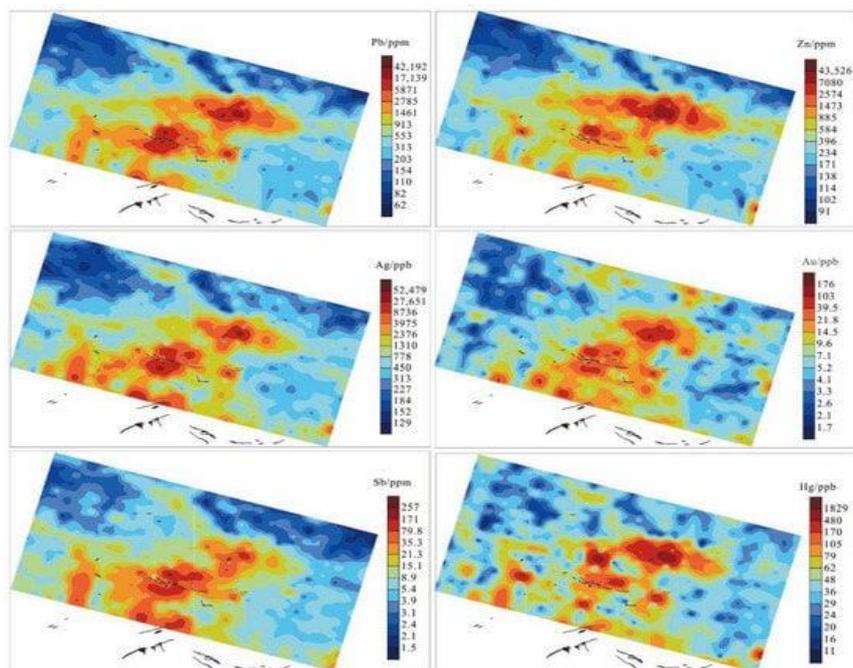


Рис. 7. Геохимическая карта содержаний Pb-Zn в мелкозернистых почвах на м-нии Хуаньюшань

Значение, соответствующее 85% квантилю, классифицируется как выброс, а аномальная область на геохимической карте окрашена от оранжевого до темно-красного. Горизонтальный разрез рудного тела накладывается на контурную карту, чтобы показать характеристики геохимического распределения элементов и позиционную взаимосвязь между аномалиями элементов (от оранжевого до темно-красного на рисунке 7) и рудным телом. Результаты показывают, что геохимические карты основных рудообразующих элементов (Pb и Zn) и элементов-индикаторов (Ag, Au, Sb и Hg) схожи, а многоэлементные аномальные сочетания в основном сосредоточены в середине скрытой рудной зоны, распространяясь с востока на запад, с центром высокой концентрации. Аномалия является непрерывной и очень хорошо соответствует рудному телу № 2. В то же время аномалия не замкнута в экспериментальной зоне и соответствует рудному телу № 3 за пределами экспериментальной зоны. Таким образом, метод анализа мелкозернистой почвы может эффективно указывать на глубоко скрытые рудные тела и может использоваться как эффективный метод поиска месторождений в пустыне Гоби.

3.2. Исследования м-ния Чжунсуйцзихуа.

Mo и Cu являются основными рудными элементами на м-нии Чжунсуйцзихуа. Содержание Mo в мелкозернистой почве колеблется от 0,93 до 5,69 ppm, при среднем значении 1,77 ppm и 1,97 ppm, что значительно выше, чем в зоне полусухих лугопастбищных угодий (среднее значение составляет 0,75 ppm, а среднее значение - 0,99 ppm). Содержание Cu колеблется от

13,1 до 43,1 ppm, со средним значением 23,8 ppm и средним значением 24,9 ppm, что также значительно выше, чем в зоне полусухих лугопастбищных угодий (среднее значение 12,1 ppm и среднее значение 15,1 ppm).

Результаты теста на размер частиц показаны на рисунке 8. Содержание Cu составляет 23,5 ppm в самой мелкой фракции (<76 мкм) почвы и 8,40 ppm в самой крупной фракции (840-4800 мкм). Более высокое содержание элементов в мелкой фракции и более низкое содержание элементов в крупной фракции также были обобщены с содержаниями Mo и As. Содержание Cu, Mo и As в мелкозернистой почве примерно в 2,79, 1,65 и 2,36 раза выше, чем в крупнозернистой почве, соответственно. Таким образом, мелкозернистая почва является подходящей средой для отбора проб для геохимических исследований на полусухой территории, покрытой лугами. Результат аналогичен результату на засушливой территории, покрытой пустыней Гоби.

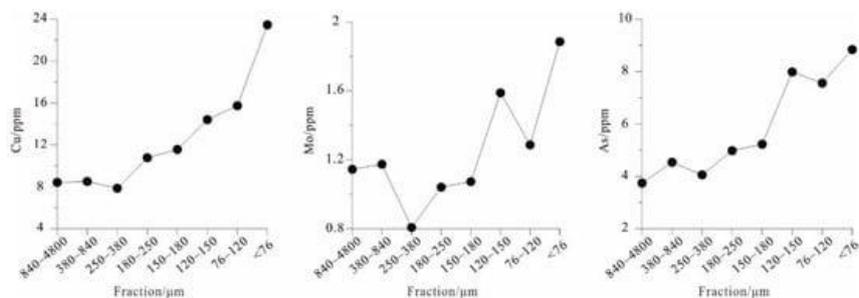


Рис. 8. Линейные диаграммы, показывающие концентрации Cu, Mo и As в различных по размеру фракциях почвы на м-нии Чжунсуйцзихуа.

На рисунке 9 показана линейная диаграмма содержаний Cu и Mo в мелкозернистой почве (<76 мкм) над скрытой рудной и фоновой зонами (синяя линия на рис. 3).

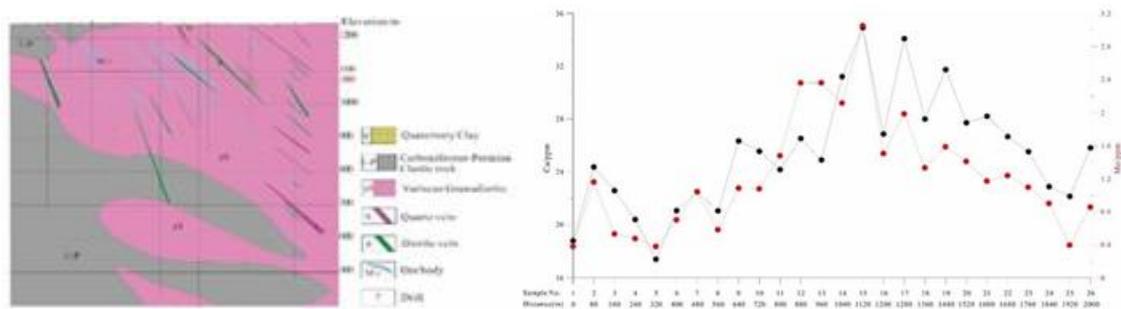


Рис. 9. Линейная диаграмма содержаний Cu и Mo образцов мелкозернистого грунта (<76 мкм) над скрытым рудным телом на м-нии Чжунсуйцзихуа.

Образец № 15 (1120 м) имеет самое высокое содержание Cu - 34,92 ppm, за ним следует образец № 17 (1280 м)-34,08 ppm. Оба образца были взяты выше месторождения. Даже самое низкое содержание Cu в 17,4 ppm (образец № 5, на высоте 320 м) составляет лишь половину от самого высокого значения. Содержание Cu, как правило, выше над рудным телом и ниже вдали от рудного тела. Эта тенденция также наблюдается в отношении Mo. Эти результаты демонстрируют, что использование мелкозернистой фракции почвы может указывать на

минерализацию Cu и Mo в полусухих районах, покрытых пастбищами. Результат аналогичен результату для засушливой территории пустынь Гоби.

Результаты площадных измерений мелкозернистого грунта на медно-молибденовом м-нии Чжунсуйцзихуа показаны на рисунке 10.

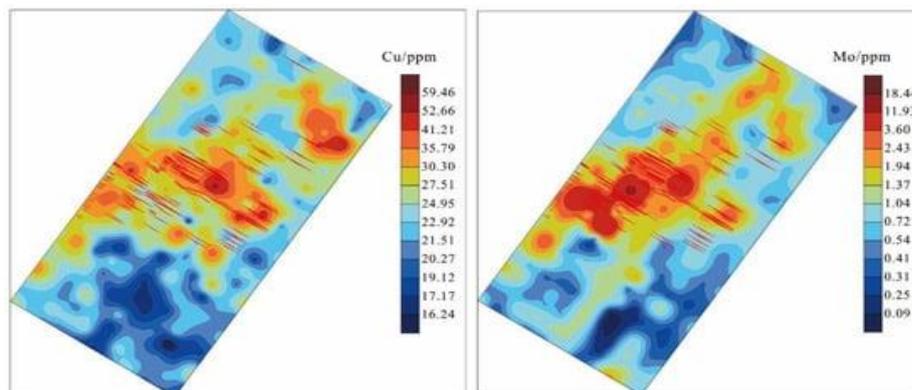


Рис. 10. Геохимическая карта содержаний Cu-Mo мелкозернистых почв на м-нии Чжунсуйцзихуа

Аномалии Cu и Mo (от оранжевого до темно-красного) распределены в середине исследуемой территории неправильной полосой. Аномалии полностью соответствуют площади вертикальной проекции молибденового рудного тела 1080, которое окружено аномалиями. В то же время более крупные кольцевые аномалии Cu и Mo также появляются в северо-восточном углу. Аномальное распределение Cu и Mo больше соответствует распределению рудных тел, особенно Mo, что указывает на то, что метод может эффективно определять скрытые рудные тела Cu и Mo. В целом, метод может быть использован для поисков месторождений в полусухих пастбищных районах.

3.3. Исследования м-ния Цюцзя.

Основным рудным элементом является золото. Содержание Au в мелкозернистом аллювии колеблется от 0,37 до 249,56 ppb, со средним значением 5,44 ppb и средним значением 21,06 ppb, что значительно выше, чем в целом в Китае (1,40 ppb) и в провинции Шаньдун (1,53 ppb).

На рисунке 11 показаны линейные диаграммы Au, Ag, Co и Cr над скрытой минерализованной зоной и над безрудными участками (синяя линия на рис. 4). Содержание Au над рудным телом (образец № 51-57, 4000-4480 м) составляет 25,7–71,4 ppb, что в 10-30 раз превышает содержание Au в фоновой зоне (около 2 ppb, образец № 18-37, 1360-2880 м). Содержание Au наиболее высокое над рудным телом и более низкое дальше от рудного тела. Ag отображает распределение, аналогичное Au. Содержание Co и Cr самое высокое над массивом основных горных пород и ниже по мере удаления от него. Эти результаты

демонстрируют, что использование метода может указывать на минерализацию Au и геологический фон на территориях, покрытых аллювием.

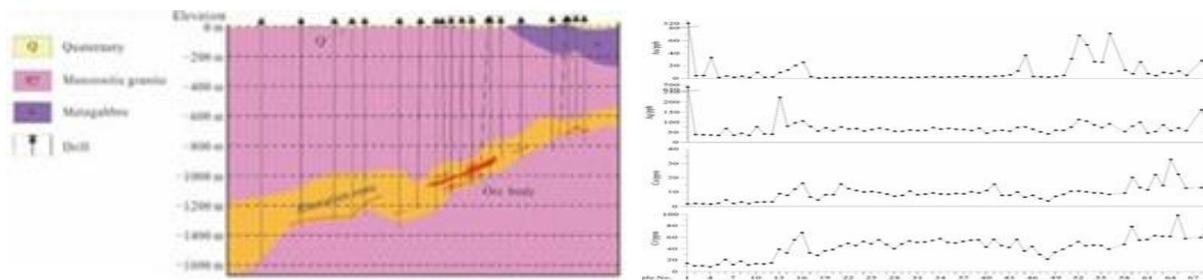


Рис. 11. Линейные диаграммы Au, Ag, Co и Cr мелкозернистого аллювия (<125 мкм) над скрытым рудным телом на м-нии Цюйя.

Геохимические карты Au и Ag (рис. 12), полученные методом анализа мелкозернистых почв на м-нии Цюйя, очень похожи. Аномальные зоны (от оранжевого до темно-красного) в основном распределены на юго-востоке площади м-ния, что соответствует глубоко скрытым рудным телам. Область аномалий велика и имеет высокую интенсивность. Аномалия простирается на юго-запад, что соответствует соседнему рудному району Чжаосянь. Аномалия также проявляется на северо-западе с высокой интенсивностью, таким образом, она не замкнута внутри тестовой зоны. Результаты показывают, что поверхностные геохимические аномалии соответствуют известным рудным телам и новым аномалиям в неизвестных областях, подтверждая эффективность метода для поисков глубоко скрытых рудных тел, перекрытых аллювиальными образованиями.

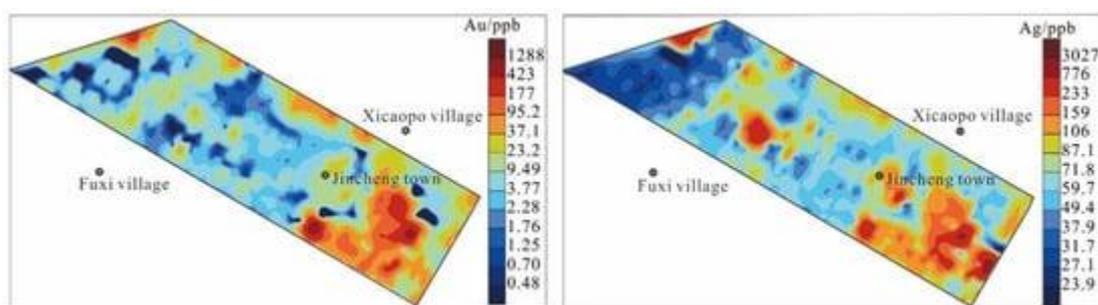


Рис. 12. Геохимическая карта содержаний Au, Ag в аллювиальном покрове на месторождении Цюйя.

4. Обсуждение.

На севере Китая многие участки покрыты золовым песком и некоторым другим переносимым покровом (аллювиальная почва и т.д.). Они могут перемещаться на большие расстояния и откладываться далеко от источника, влияя на эффективность механизмов миграции металлов в покрове и на поиски. Минеральный состав и подвижность посторонних веществ делают его наиболее мешающим для геохимического картирования в северном Китае.

Метод мелкозернистой разведки почвы позволил достичь оптимальных результатов на покрытых территориях.

Ученые предложили множество теорий миграции металлических элементов через покрывающий слой. К ним относятся физическое и химическое высвобождение элементов в процессе выветривания, вынос на поверхность растворенных элементов в круговороте грунтовых вод, диффузия ионов, окислительно-восстановительный потенциал, испарение, поглощающая способность корневой системы растения, газораспределение и элементы, переносимые газом. Были обобщены механизмы переноса металла вверх через транспортируемый покров (табл. 1).

Табл. 1.

Краткое описание различных механизмов переноса металлов вверх через покров.

Mechanism	Force	Medium	Process	Limiting Factors	
Phreatic	Dilatancy pumping	Stress	Water	Groundwater pumped upwards due to compressional stress along faults or fractures. Arid climates favor rapid evaporation and restriction of metals	Requires neotectonic active areas/faults through transported cover. Confirmation of visible groundwater effusion after earthquakes
	Glacial tectonic pressure	Stress	Water	Groundwater pumped upwards in more porous zones due to change in hydraulic gradient as ice shifts	Requires retreating glacial ice. Requires preferential flow paths through the cover via faults and fractures
	Convection (heat)	Heat	Water	Faster upward migration of ions due to currents generated by density or heat	Needs sulfide-rich oxidizing deposit. Effectiveness over deposit not fully proven. Limited to water table
	Bubble	Pressure/buoyancy	Gas	Metal ions and nanoparticles attach to upward streaming carrier gas bubbles (CO ₂)	Fate of bubbles and attached particles is unclear
	Diffusion (indirect effects)	Concentration gradient	Water	Diffusion along concentration gradient from deep to surface	Very slow process, with only H ⁺ migrating fast enough through saturated cover
	Spontaneous potentials	Self-potentials	Water	Electrical currents set around from sulfide ore with concentration of cations at edges	Process is limited to shallow cover. Relies on diffusion process to pass through thick cover
	Redox gradient	Redox gradient	Water	Redox differences between oxidizing near surface and reducing base of cover. Faster migration in voltaic gradient	Needs saturation conditions and associated redox gradient for effective transfer
Vadose	Capillary	Pressure/suction	Water	Surface tension-related rise of groundwater above water table. Evaporation at surface drives suction upwards	Upward extent is unclear and operation in heterogeneous textural materials are unproven. Groundwater generally is at >10 m in arid areas
	Gaseous diffusion	Concentration gradient	Gaseous	Oxidizing ore body produce gases (CO ₂ , COS, SO ₂ , CH ₄) and volatiles (Hg, AsH ₃) diffusion through porous media	Migration along preferential pathways (structural conduits). Gas signal is complicated by biological released gases. Temporal stability of many gaseous species is limited
	Barometric pumping	Pressure	Gaseous	Rapid advective transport of gases in fractured media via barometric pumping	It is limited to fractured media
	Gas convection	Heat gradient	Gaseous	Air temperature differences drive hotter gases from the ore body upwards	Limited to hilly regions or for low-relief regions, permeable covers, high sulfide contents, and oxidizing conditions
	Plant uptake and release to surface via litter	Physiological/pressure	Water/regolith	Absorption of metals from water table or anomalous zone, accumulation in organs and release to surface via litter	Limited to root penetration depths (maximum 30 m). Anomalous water or regolith is required for plants to give a response. Species-related uptake is unclear
	Plant uptake and release to soil-hydraulic lift	Physiological/pressure	Water/regolith	Water absorption from depth (water table) and release near surface (upper soil horizon)	Metal transfer with water is not confirmed. Depth from which water is lifted is poorly constrained. Limited to understanding of the process
	Bioturbation and gravity	Animal metabolism	Regolith	Vertical and lateral movement of material from depth to surface by burrowing activities of conveyor belt organisms (termites and ants)—biomantle	In many areas, it is limited by depth of biomantle (<5 m). Further information on burrowing depths of ants and termites in dry settings

Был предложен многоэлементный механизм миграции, основанный на взаимодействии земного газа. Предполагается, что в засушливой местности Гоби информация о минерализации под покровом может быть выявлена на уровне нано- и микроуровней. Элементы

высвобождаются из рудного тела и связанных с ним измененных пород в процессе выветривания. Из-за засушливого рельефа Гоби глубина залегания грунтовых вод составляет сотни метров, а растительность редка. Таким образом, вода и растительность, по-видимому, играют очень ограниченную роль в переносе элементов вверх, к поверхности, несмотря на испарение и капиллярное действие растений, потенциально способствующих усвоению минералов во время дождей.

Следовательно, процесс миграции зависит от множества агентов, при этом газ рассматривается как основная среда для вертикальной миграции элементов. Убедительные доказательства получены в результате детальных исследований земного газа и почвы над рудными телами с помощью просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ), оснащенного энергодисперсионной спектроскопией. Эта технология позволяет определять характеристики сложных нанометаллических частиц в руде, геогазе и почве в масштабе от нескольких десятков до сотен нанометров. Это также было подтверждено в засушливой среде Австралии и Чили.

После миграции активных металлических элементов из глубинных рудных тел на поверхность они неизбежно будут встречаться в поверхностной среде в различных формах, включая ионные соединения, комплексы, растворимые соли, коллоиды, элементарные частицы и частицы минеральных сплавов. Независимо от того, в какой форме они существуют, активные металлические элементы часто заряжены положительно, поэтому они легко адсорбируются отрицательно заряженными глинистыми минералами и/или оксидами железа и марганца. Глинистые минералы являются наиболее важными вторичными минералами в почве, в основном вторичными кристаллическими слоистыми силикатами, включая каолин, монтмориллонит, иллит, хлорит, гидрослюда и вермикулит. Коллоидная поверхность глинистых минералов заряжена и имеет большую удельную поверхность, поэтому она является идеальным носителем активных металлических элементов, а глинистые минералы в основном содержатся в мелкозернистых компонентах почвы. Кроме того, оксиды железа и марганца в изобилии содержатся в поверхностной почве, а пленки оксидов железа и марганца часто покрывают поверхность минеральных частиц. Удельная площадь поверхности оксида железа-марганца в почве увеличивается экспоненциально с уменьшением размера образца (рис. 13). Чем больше удельная площадь поверхности, тем сильнее ее способность адсорбировать активные металлические элементы. Следовательно, физическое разделение мелкозернистых компонентов почвы может эффективно обогащать почву активными металлическими элементами. Например, в засушливых районах пустыни Гоби, по мере уменьшения размера частиц почвы увеличивается количество таких элементов, как Al_2O_3 , Fe_2O_3 и Mn, представляющих собой глинистые минералы и оксиды железа и марганца. Одновременно

увеличивается и содержание рудообразующих элементов (рис. 14). Из вышесказанного видно, что мелкозернистые вещества являются естественными “колодцами-ловушками” для активных металлических элементов из-за их сильных свойств адсорбции и обмена.

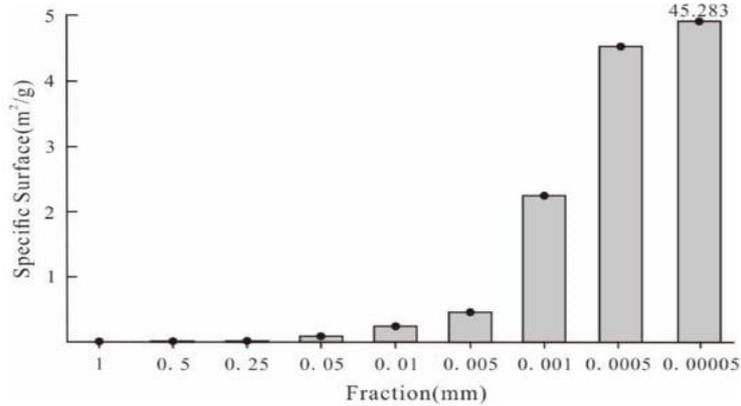


Рис. 13. Удельная поверхность различных фракций зернистости в почве.

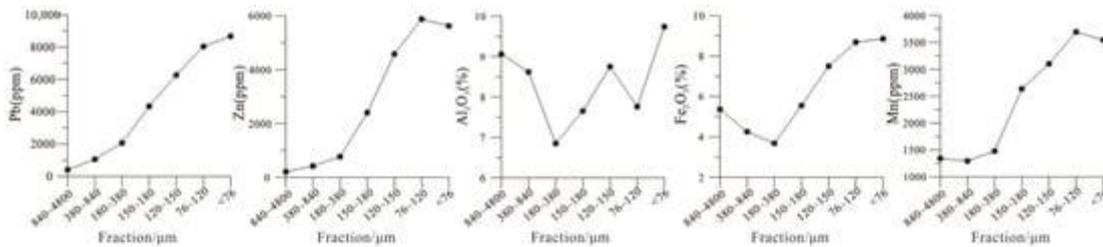


Рис. 14. Линейная диаграмма Pb, Zn, Al₂O₃, Fe₂O₃ и Mn в различных по размеру фракциях почвы пустыни Гоби.

В пустыне Гоби эоловый песок является основным фактором, препятствующим отбору проб среды для геохимических исследований. На долю эоловых песков приходится очень низкая доля частиц размером >830 и <120 мкм, и более 90% эоловых песков сосредоточено в частицах размером 120-830 мкм. Таким образом, крупнозернистая почва (>830 мкм) и мелкозернистая почва (<120 мкм) не нарушаются эоловым песком, и обе могут быть эффективными материалами для отбора проб для исследований минерализации. Более крупная фракция почв (массовая доля составляет 21,9%) состоит в основном из кварца и полевого шпата, за которыми следуют гипс и кальцит. В промежуточной фракции (120-830 мкм) преобладают кварц, гипс, полевой шпат и кальцит с небольшим количеством глинистых минералов, а ее массовая доля составляет 58,6%. Мелкозернистая фракция (массовая доля составляет 19,5%) состоит в основном из кальцита и глинистых минералов, включая иллит, каолинит и хлорит. По мере изменения размера частиц образца от крупных к мелким наблюдалось несколько тенденций: (1) содержание кварца и полевого шпата постепенно уменьшается — более крупная фракция почв содержит 32,4% кварца и 33% полевого шпата, в то время как мелкая фракция содержит 13,6% кварца и 9,4% полевого шпата соответственно, и (2) содержание глинистых минералов постепенно увеличивается, и содержание глинистых

минералов в более крупной фракции почв составляет 7,7% и 40,3% в мелкой фракции. Кроме того, щелочная почва (со значением рН 7,5–9,5) может образоваться из-за того, что испарение превышает количество осадков в этом регионе, и скальный материал в почве накапливается на поверхности под действием испарения, делая поверхностную почву щелочной. Eh отрицательно коррелирует с рН. Когда рН изменяется в определенном диапазоне, величина дзета-потенциала на поверхности глинистых минералов также изменяется. В щелочных условиях количество отрицательного заряда на поверхности глинистых минералов увеличивается. Это также подтверждено в эксперименте по адсорбции каолинитом и галлуазитом редкоземельных элементов. Кроме того, электропроводность мелкозернистых образцов в поверхностном грунте была значительно выше, чем у крупнозернистых образцов. Это может способствовать более легкому поглощению положительно заряженных ионов металлов мелкозернистыми образцами.

В этом исследовании экспериментальная работа метода поиска мелкозернистого грунта представлена на трех участках добычи полезных ископаемых. Кроме того, эффективность метода оценивается путем обсуждения рудообразующих элементов (Pb и Zn на месторождении Huaniushan, Pb-Zn, Co и Mo на месторождении Zhunsujihua Cu-Mo и Au и Ag на месторождении Qujia Au) на каждом экспериментальном участке. Этот метод также подходит и применим для месторождений других элементов, таких как медная и никелевая руда, а также руды редких металлов и даже урановая руда. В последние годы были проведены геохимические исследования регионального масштаба (1:200 000 или 1:1 000 000) с использованием метода мелкозернистой почвы. Были определены стратегические целевые зоны крупномасштабных поисков: (1) месторождений урана типа выщелачиваемого *in situ* песчаника в пустынной зоне бассейна Турфан-Хами; (2) месторождений Pb-Zn в полусасушливой местности, покрытой лугами; (3) медно-никелевого оруденения в зоне покрытия аллювиальной почвой. В частности, геохимические аномалии содержания урана в почве имеют соответствующую связь с ураносодержащими геологическими телами, включая скрытую минерализацию урана руды и гранитных интрузий в зоне лугопастбищных угодий.

Таким образом, приведенные выше результаты демонстрируют, что метод геохимических поисков на основе мелкозернистого грунта может выявлять скрытые рудные тела под покровом.

5. Выводы.

1. Вероятность обнаружения новых месторождений в обнаженных районах уменьшилась, и поиск скрытых месторождений стал центром внимания.

2. Геохимический метод исследования мелкозернистых почв показал положительные результаты в пустыне Гоби, в полупустынной местности, покрытой лугами и в местности, покрытой аллювием территории северного Китая.

3. В качестве глубоко проникающей геохимической технологии, которая может отражать информацию о глубоких аномалиях, мелкозернистая почва богата глинистыми минералами, оксидами железа и марганца, с большой удельной поверхностью и высокой адсорбционной способностью, что может эффективно ее обогащать металлическими элементами.

4. Диапазон аномалий, выявленных указанным методом, хорошо согласуется с известным местоположением разнотипного оруденения. Соответствующая взаимосвязь может эффективно указывать на скрытые рудные тела и очерчивать аномалии в непоискованных областях. Таким образом, этот метод может быть применен для геохимических поисков скрытого оруденения.

IV. ОСНОВЫ ФИТОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОИСКОВ СКРЫТОГО ОРУДЕНЕНИЯ (Центрально Африканский медно-кобальтовый пояс) [7].

1. Введение.

Центрально Африканский меднорудный пояс (ЦАМП) — это металлоносная провинция мирового класса, в которой залежи меди и кобальта находятся в осадочных породах и простираются вдоль границы между Замбией и Демократической Республикой Конго. С момента его международного открытия в начале 1900-х годов в геологоразведке для поиска полезных ископаемых использовались различные поверхностные геохимические среды, в том числе почвы, термитники, речные отложения и обломки горных пород. В настоящее время геологоразведка все чаще направлена на поиск месторождений, скрытых на разной глубине.

Кустарники и деревья с глубокой корневой системой, устойчивые к повышенным концентрациям металлов в почве, стали предметом растущего интереса для геолого-поисковых и геохимических исследований по всему миру. В последнее время геохимия растений используется в сочетании с другими поверхностными средами для обнаружения аномалий металлов, связанных с месторождениями полезных ископаемых. Было обнаружено, что такая фитогеохимия эффективно определяет аномалии, связанные с минерализованными зонами из глубоких источников, на ряде рудных месторождений по всему миру, включая; месторождение Кангерлуарсук (Zn-Pb-Ag) в Гренландии, месторождение Твин Лейкс (Au) в Канаде и минеральные системы (IOCG) в Австралии.

Большинство видов растений проявляют чувствительность к высоким концентрациям металлов, а другие проявляют толерантность и накапливают металлы в своих корнях и/или надземных частях, таких как побеги, цветы, стебли и листья. В ЦАМП присутствуют купрофиты и кобальтофиты, представляющие широкий спектр видов растений, которые потенциально могут быть полезны при применении фитогеохимии для определения целевых показателей ГРР. Эти виды включают как гипераккумуляторы, полезные при фиторемедиации, так и эксклюзивы, связанные с фитостабилизацией. Виды растений-индикаторов были описаны как те, которые постоянно ограничены узким и характерным экологическим диапазоном и, таким образом, могут быть связаны с пространственно ограниченными минерализованными зонами. Однако независимые геологические и фитогеохимические переменные, связанные с разнообразием растительных сообществ, остаются неясными.

Цель этого обзора — (1) подробно рассмотреть геологические и геохимические факторы, влияющие на закономерности накопления металлов в почвенно-растительных системах в ЦАМП; (2) выделить потенциальные возможности для интеграции геохимии наземных

растений в новые технологии ГРР; (3) выявить пробелы в исследованиях и предложить дальнейшие направления для развития фитогеохимии как метода отбора проб при поисках ПИ.

2. Методология.

Этот обзор проводился с использованием руководства "Предпочтительные статьи для представления систематических обзоров и мета-анализов" (PRISMA) (рис. 1) с использованием авторитетных научных онлайн-баз данных. В базах данных литературы, поиск по которым проводился в рамках этого исследования, были Google Scholar, Web of Science, Science Direct и Springer. Этот поиск литературы включал статьи, посвященные геохимии наземных растений в ЦАМП и ее использованию при поисках Cu–Co оруденения. Поиск ограничен исследованиями, опубликованными в основном в период с января 2005 года по март 2023 года.

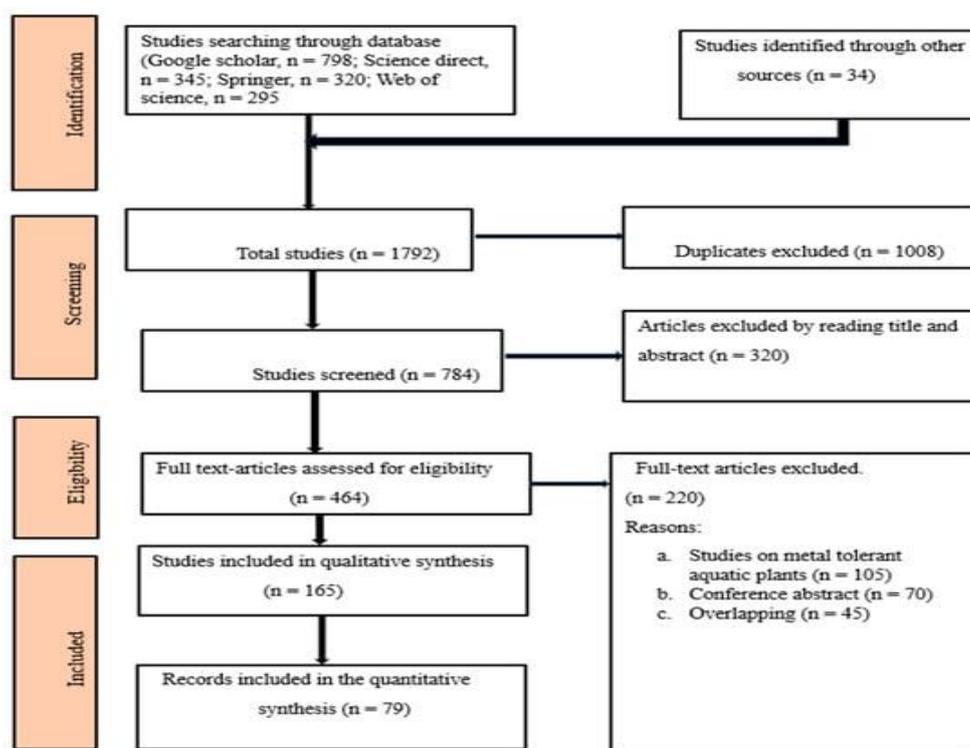


Рис. 1. Блок-схема PRISMA отбора литературы в это исследование.

Подход PRISMA позволил провести анализ 1758 исследований из онлайн-баз данных и 34 исследования из других источников. В конечном итоге было отобрано в общей сложности 165 и 79 исследований для проведения качественного и количественного синтеза соответственно. Масштаб поиска был сокращен до тропической и субтропической среды, поскольку сходство климатических условий может способствовать появлению сходных видов растений, а также аналогичного оруденения. В таблице 1 приведены краткие сведения о ключевых материалах для получения соответствующих компонентов обзора и дальнейшей обработки.

Комбинации ключевых статей для обзора и дальнейшей обработки.

Research Component	Addressed in Section	Search String
1. Geological and Geochemical controls on plant species distribution in Cu–Co mineralized sites	Section 3.1: Section 3.3	[[[All: geological] AND [All: phytogeochemistry]] OR [[All: plants] AND [All: geology]] OR [[All: soil] AND [All: metal]] AND [[[All: Anomalies] AND [All: Central African Copperbelt]] AND [All subjects: Exploration and Environmental Geosciences] AND [All subjects: Ecology- Environmental studies] AND [All subjects: Environmental studies] AND [Article Type: Article] AND [Language: English] AND [Publication Date: (1 January 2005 to 31 March 2023)]]
2. Use of metal tolerant plants as ore deposit indicators	Section 3.4: Section 3.5	[[All: "terrestrial plants"] OR [All: "plants"]] AND [[All: "metallophyte"] OR [All: "indicator"]] AND [[All: "hyperaccumulator"] AND [All: "metal"] AND [All: "mining"] OR [All: "exploration"] AND [All: "environmental"]] AND [Language: "English"]
3. Emerging phytogeochemistry integrative mineral exploration technologies	Section 4.2	[[All: "plants"] OR [All: "mineral exploration"]] AND [[All: "prospecting"] OR [All: "emerging"]] AND [All: "technologies"]] OR [All: "Remote"]] OR [All: "Sensing"]] OR [All: "GIS"]] OR [All: "machine learning"]] AND [All: "deep learning"]] AND [All: "metallophyte"]] AND [Language: "English"]

Была проведена полнотекстовая оценка, чтобы исключить исследования, касающиеся водных видов растений, тезисов конференций и пересекающихся исследований. Что касается количественного синтеза, были рассмотрены образцы почв, взятые из горизонта В (30-60 см), и в обзор были включены образцы растений как с «загрязненных», так и «незагрязненных» участков. Чтобы избежать предвзятости на начальном этапе поиска и максимально увеличить количество статей с глобальным охватом, независимо выполнили поиск в цифровых базах данных, используя поисковые термины с незначительно отличающимися синонимами. За этим последовал перекрестный анализ результатов поиска, в котором те же критерии фильтрации использовались для указания периода, типа документа, региона и области исследования. На втором этапе извлеченные метаданные были проверены на полноту и оригинальность.

Результаты поисковых систем были импортированы в Mendeley reference manager версии 1.19.8. На основе протокола фильтрации PRISMA наблюдается заметный рост исследований, посвященных металло-устойчивым видам растений, связанным либо с загрязнением, либо с естественной гипераккумуляцией в ЦАМП (рис. 2). Это говорит о растущем интересе к внедрению металлофитов и использованию геохимического следа наземных растений при поиске полезных ископаемых.

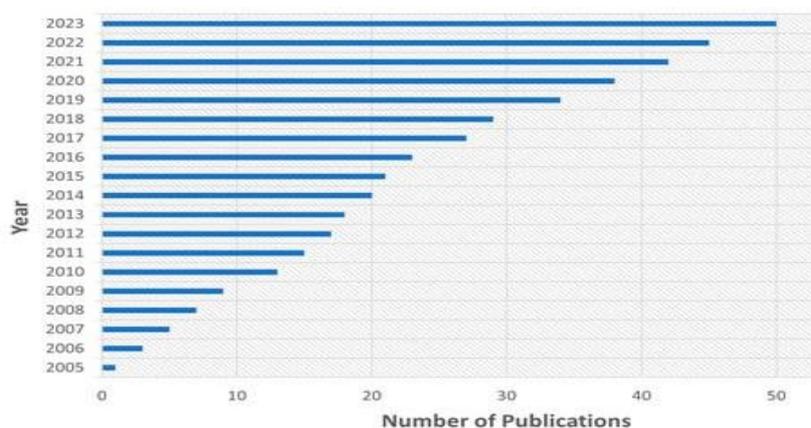


Рис. 2. Рост публикаций по металло-устойчивым видам растений ЦАМП.

Исследования, проведённые в тропиках, в частности в Австралии, Бразилии и Ботсване, показывают, что различные органы растений (корни, стебли и листья) могут использоваться для определения индикаторных и ориентирующих элементов, связанных с минерализованными зонами. Большинство исследователей сосредоточились на использовании геохимии растений для поиска Au, Cu, Ni, Pb, Zn и U. Все эти элементы связаны с медно-кобальтовыми месторождениями, залегающими в осадочных породах ЦАМП, хотя некоторые более ранние исследования показывают, что большинство анализов растений в этом регионе проводились на загрязнённом материале и что, несмотря на гиперконцентрацию Cu-Co, истинные масштабы этого явления остаются неясными.

Тем не менее, современные достижения в области элементных и минералогических аналитических методов, включая использование сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной спектроскопией (SEM-EDS) и синхротонной рентгеновской спектроскопии поглощения (XAS), предоставляют возможность определить вклад потенциального поверхностного загрязнения во внутренние концентрации Cu и Co в растительном материале. Это обеспечивает основу для интеграции геохимии наземных растений в поиски Cu-Co оруденения. Кроме того, быстро растущий глобальный интерес к технологиям ГРП с низким уровнем воздействия и экологически чистым технологиям подчеркивает необходимость использования поверхностных геохимических проб почвы и растений при определении целей поисков. Данные, полученные с помощью их применения, могут быть полезны при построении геологических моделей регионального и локального масштаба, которые помогают понять геологические процессы и выявлять глубокозалегающие скрытые месторождения ПИ с минимальным воздействием на окружающую среду. Однако исследования также выявили существующие слабые связи между геохимическими, геологическими и соответствующими фитогеохимическими переменными, необходимыми для картирования скрытых минерализованных зон в пространственно-временных масштабах.

3. Пространственные тенденции геологического и геохимического воздействия на характеристики и распространение видов растений.

3.1. Геологические условия ЦАМП.

Центрально-Африканский медный пояс является одним из крупнейших экономических скоплений меди в земной коре и вносит основной вклад в глобальные запасы меди и кобальта. В ЦАМП ведется разработка месторождений в нескольких рудных районах мирового класса, включая высокосортный замбийский медный пояс (ZCB), конголезский медный пояс (CCB) и низкосортные, но высокотоннажные месторождения в регионе Доумс на северо-западе Замбии (рис. 3).

Кроме того, это важный источник других металлов, включая Ag, Pb, Zn, а также может содержать значительное количество германия (Ge), Au, Ni, элементов платиновой группы и рения (Re). Рудные месторождения ЦАМП расположены в пределах северо-юго-восточных (NW-SE) простирающихся осадочных пород неопротерозойской катанганской супергруппы. Присутствует широкий спектр вмещающих пород, включая обломочные и карбонатные породы, отложенные в ряде протяженных суббассейнов в пределах широкой котловины Катанга, которая образовалась в результате распада Родинийского суперконтинента. Предполагаемая максимальная мощность катангской толщи, как полагают, составляет приблизительно 5-10 км в конголезской части бассейна.

Большинство исследований предполагают непрерывную, но многоступенчатую минерализацию Cu-Co, простирающуюся от начального периода рифтообразующего осадконакопления около 815 млн лет назад до поздней орогенной стадии минерализации между 580-500 млн лет назад. Источник металлов и значительные запасы полезных ископаемых остаются неясными, но существует общее мнение, что металлы были получены как из базальных кремнекластичных отложений красного слоя группы Роан, так и из пород фундамента. Большинство рудных месторождений района залегают вблизи крупных региональных, первоначально синседиментационных разломов или крупных антиклинальных структур, связанных с инверсией бассейна. Эти структуры могут быть каналами миграции минерализованных флюидов и потенциально могут сделать металлы доступными для поглощения растениями из вод и почв.

Различные геофизические методы, которые использовались для литостратиграфического и структурного картирования в ЦАМП при ГРП оказались мало эффективными. Это связано с тем, что искомое оруденение, как правило, не является массивно сульфидным, оно немагнитно. Его нельзя выявлять электромагнитными (ЭМ) и аэромагнитными методами. Методы индуцированной поляризации (IP) и самопотенциала (SP) имели лишь ограниченный успех,

даже несмотря на то, что рудные тела характеризуются рассеянными сульфидами. Это может быть связано с обширными территориями, содержащими рассеянные сульфиды, что затрудняет надежное разделение сигналов для областей, содержащих преимущественно сульфиды меди.

3.2. Фитогеографическая характеристика ЦАМП.

Фитогеохимия может быть средством повышения успешности поисков. Территория, на которой залегают пласты Катанган, в основном характеризуется типом растительности миомбо (рис. 3, 4), для которого характерен широкий спектр видов растений, что позволяет предположить возможность выбора видов для фитогеохимических исследований.

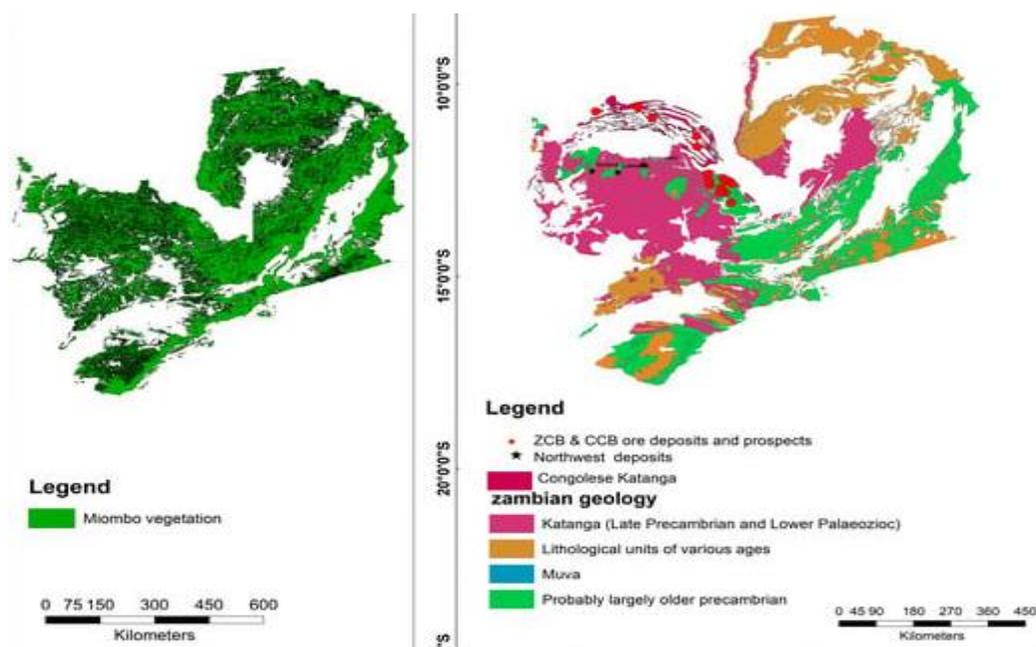


Рис. 3. Геологическая карта и карта растительности Замбии и Юга Демократической Республики Конго.

Congolese Copperbelt				Supergroup	Zambian Copperbelt				Generalised rock units		
Member	Formation	Subgroup	Group		Group	Subgroup	Formation	Member			
Petit Conglomerate		Biano	Kundelungu	~ 540 Ma	Kundelungu			Petit Conglomerate	Red arkose, conglomerate, shale		
		Ngule							Dolomitic sandstone		
		Kyandamu	Gombela					Glacial diamictite			
Grand Conglomerate		Bunkeya	Nguba	~ 635 Ma	Nguba		Grand Conglomerate	Shallow marine carbonate			
		Mwale				Muombe			Glacial diamictite		
		Mwashya	Roan	~ 740 Ma	Roan	Mwashya		Shale and siltstone			
	Kansuki	Dipeta							Upper Roan		
	Mofya					Mines	Lower Roan				
	R.G.S								R.A.T		
	Kambove										
	Dolomitic shales (S.D)								Kitwe	Copperbelt Orebody	
	Kamoto								Mindola clastics		
				< 880 Ma							
				Basement	Basement			Basement			

Рис. 4. Литостратиграфия ЦАМП.

Миомбо — преобладающая растительная формация в Центральной и Южной Африке, насчитывающая около 650 видов, эндемичных для этого региона. Среди этих видов растений

57 являются абсолютными металлофитами, которые встречаются исключительно на почвах, обогащённых медью и кобальтом, а 23 являются факультативными металлофитами, при этом более 75% известных популяций растений встречаются на почвах, богатых медью и кобальтом. Распределение растительности в ЦАМП связано с формой и концентрацией биодоступной меди и кобальта, а также с взаимодействием нескольких химических факторов. На разнообразие видов растений влияет ряд химических фракций меди и кобальта в почве, которые либо повышают, либо понижают биодоступность металлов. Аномалии содержания металлов в почве на минерализованных территориях являются результатом выветривания пород Катанган с естественным повышенным содержанием меди и кобальта. Процесс формирования почвы в основном обусловлен как физическими, так и химическими изменениями исходного материала горных пород, и эти процессы можно обобщить как растворение, гидратацию, гидролиз, окисление, восстановление и карбонизацию. Соединения меди и кобальта высвобождаются из материнской породы и распределяются в различных фазах почвы, а именно: в твёрдой, коллоидной и растворимой фазах почвы в зависимости от характерных свойств почвы, таких как рН, содержание органических веществ, концентрация металлов и окислительно-восстановительные условия.

3.3. Минерализация и геохимия микроэлементов.

Типичные Cu-Co рудные минералы в ЦАМП включают халькопирит, борнит, карнотит, халькозин, гетерогенит и малахит. Эти минералы обычно распределяются вдоль плоскостей напластования и встречаются в виде конкреций или в виде прожилок и заполнений трещин как в обломочных, так и в карбонатных породах. Галенит, сфалерит, пирит и пирротин обычно присутствуют на периферии медно-кобальтовых месторождений, представляя собой свинцово-цинково-железные ореолы, которые являются характерной особенностью осадочных медно-кобальтовых месторождений. Геохимические исследования стратиформных месторождений меди демонстрируют геохимическую ассоциацию Cu-As-Ni-V-Mo-Bi ± Pb, Zn, U, Co, при этом большинство элементов являются второстепенными компонентами доминирующих сульфидов Cu-Co. Ряд месторождений в Замбии связан с изменением содержания калия. Однако некоторые месторождения, такие как Кансанши и Фронтир, имеют натриевую альтерацию, в то время как большинство конголезских месторождений, как правило, имеют признаки магниальной альтерации.

Изменение гипергена имело важное значение для ЦАМП. Наиболее распространенными медьсодержащими минералами, характеризующими гипергенную зону, являются халькоцит, малахит и хризоколла; гетерогенит образует наиболее важный кобальтовый гипергенный минерал. В дополнение к этим, обычно присутствуют другие вторичные минералы Cu-Co,

включая самородную медь, куприт, тенорит, азурит, либетенит, псевдомалахит, сферокобальтит и карбонат кобальта.

Наиболее известны гипергенные изменённые и минерализованные породы на небольшой глубине, но они встречаются и на глубине более 1 км. Однако большинство месторождений, связанных с гипергенной минерализацией, находятся на глубине менее 100 м. Эта глубинная зональность характеризуется поверхностной выщелоченной зоной, состоящей в основном из гематита, которая перекрывает обогащённую оксидами зону, состоящую преимущественно из малахита в карбонатных месторождениях и хризоколлы в кремнисто-обломочных породах. Ниже находится смешанная/переходная зона с совместным существованием гипергенных оксидных и сульфидных минералов, которая переходит в богатую сульфидами зону (рис. 5).

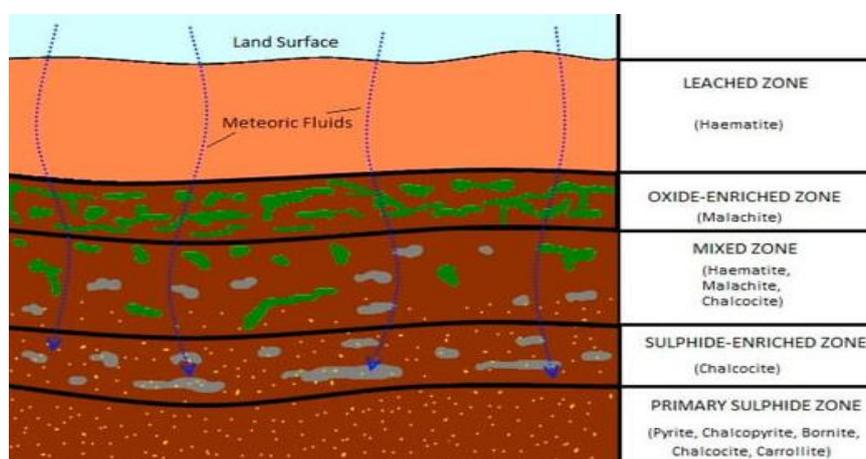


Рис. 5. Зональность гипергенной минерализации в ЦАМП: зоны изменений и преобладающая минералогия руд.

Процесс обогащения минерализацией гипергенных соединений инициируется реакцией гипогенных сульфидных минералов с очень низкой соленостью и метеоритных флюидов с высоким содержанием кислорода при низкой температуре ($<30^{\circ}\text{C}$). При растворении атмосферного диоксида углерода в дождевой воде образуется разбавленная углекислота, которая вступает в реакцию с пиритом и сульфидами Cu–Co. Реакция повышает кислотность метеоритной жидкости и улучшает ее способность вызывать дополнительные гипергенные изменения. Выпадение гипергенных руд в первую очередь контролируется значительным падением окислительно-восстановительного потенциала (Eh), которое часто происходит поверх слабо насыщенных кислородом грунтовых вод. Таким образом, зона оксидных руд обычно находится в основании вадозной (ненасыщенной) зоны. Переходная/смешанная зона находится между ними и обычно связана с колебаниями уровня грунтовых вод. Однако современный уровень грунтовых вод может не соответствовать положению палеофреатических зон, которые существовали во время формирования этих супергенных рудных тел.

3.4. Геохимический контроль поведения металлов в системах наземных растений.

Основные биотические и абиотические процессы, которые влияют на поведение металлов в почвенно-растительных системах, показаны на рисунке 6. Почвы являются геохимическим поглотителем микроэлементов, а ионы металлов вступают в ряд реакций как в твёрдой, так и в водной среде, которые варьируются в пространственно-временных масштабах. Таким образом, химический состав почвы динамичен и зависит от многофазного равновесия, включающего: (а) твёрдую фазу, то есть филлосиликаты, в том числе глинистые минералы, такие как каолинит, иллит, смектит и т. д., и гидратированные оксиды, в том числе гидратированные оксиды марганца, железа и алюминия, а также твёрдое органическое вещество; водную фазу, состоящую из воды и растворённых компонентов, таких как свободные ионы металлов, комплексные ионы, растворённый органический углерод и другие лиганды.

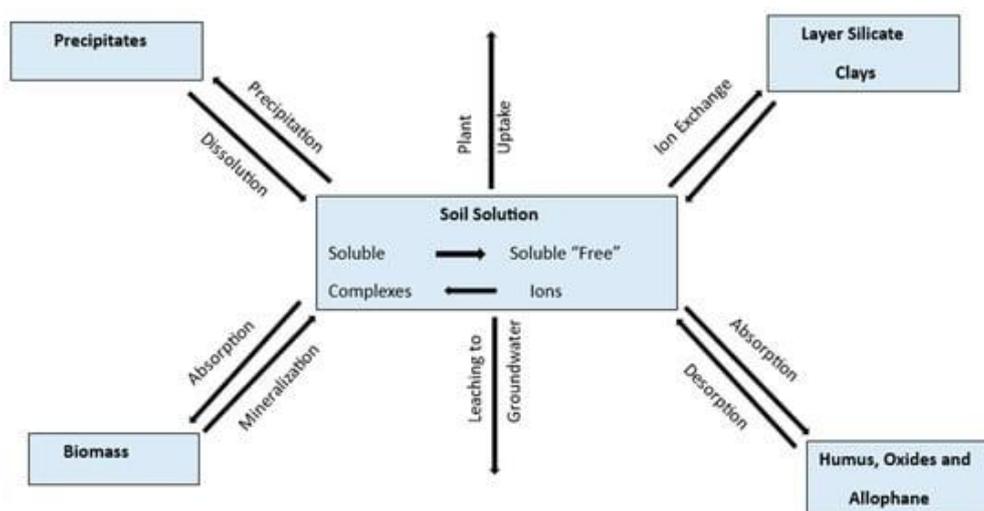


Рис. 6. Взаимодействия в почвенно-растительных системах, влияющие на распределение микроэлементов.

Из рисунка 6 видно, что основные процессы, определяющие поведение металлов в системах почва–растения, включают ионный обмен (адсорбция-десорбция), солубилизацию (выпадение в осадок-растворение) и абсорбцию (ассимиляцию или иммобилизацию) живой биомассой. Микроорганизмы и корни растений взаимодействуют с растворенными в почве видами, а микробный и корневой экссудат может влиять на растворимость и конечный перенос образующихся соединений. По сути, эти процессы сильно влияют на биогеохимическое формирование элементов и контролируют их растворимость, подвижность, биодоступность и обогащение металлами растений. Кроме того, биогеохимические процессы зависят от нескольких основных переменных, таких как pH, Eh и емкость катионного обмена (СЕС), и они играют ключевую роль в подвижности и биоаккумуляции элементов в растениях. Однако это не исключительные переменные, поскольку существуют и другие био-геохимические факторы

и факторы окружающей среды, которые могут влиять на фитогеохимические процессы, подвижность элементов и биоаккумуляцию.

Как правило, способность почв удерживать микроэлементы увеличивается с повышением рН. Биодоступность Cu, Co, Zn, Ni и Pb значительно снижается в щелочных почвах. Таким образом, кислые почвы способствуют поглощению металлов растениями, и содержание металлов в надземных частях растений может быть значительно выше нормы. рН является одним из основных факторов, определяющих биогеохимические процессы, поскольку он может влиять на поверхностный заряд силикатных глин, органического вещества и оксидов железа, марганца и алюминия. Помимо влияния на сорбцию катионов и комплексообразование с органическим веществом, он также влияет на реакции осаждения-растворения, окислительно-восстановительные реакции, подвижность, вымывание и дисперсию коллоидов. В то время как рН почвы является наиболее важным или определяющим фактором, влияющим на доступность металлов в почвенно-растительных системах, другие факторы, такие как СЕС и Eh, также могут влиять на растворимость, подвижность и биодоступность. Восстановительные условия, характеризующиеся значительным падением Eh и низким рН, приводят к образованию сульфидов металлов, но они совершенно нерастворимы, так что подвижность и биодоступность металлов значительно ниже, чем можно было бы ожидать в окисленных почвах. Таким образом, степень окисления и химические соединения влияют на реакционную способность и подвижность металлов в окружающей среде.

Кроме того, на фитогеохимическое поведение металлов влияют и другие физико-химические свойства элементов, в том числе электроотрицательность и ионный потенциал. Например, электроотрицательность влияет на порядок, в котором микроэлементы поглощаются компонентами почвы. Поэтому более электроотрицательные металлы образуют более прочные ковалентные связи с атомами кислорода. Для некоторых двухвалентных металлов установлено, что предпочтение связывания, основанное на электроотрицательности, составляет: $Cu > Ni > Co > Pb > Cd > Zn > Mg > Sr$. Однако эта картина может отличаться из-за ионного потенциала (отношения заряд/радиус), который влияет на прочность связи, и, таким образом, предпочтительным связыванием будет $Ni > Mg > Cu > Co > Zn > Cd > Sr > Pb$. По сути, химическая форма нахождения металла играет важную роль в оценке его подвижности, биодоступности и потенциального поглощения наземными растениями. Влияние различных геохимических факторов на подвижность и биодоступность микроэлементов, включая медь и кобальт, представлено в таблице 2. Помимо влияния выделенных геохимических переменных на поведение металлов в наземных растительных системах, на подвижность и биодоступность микроэлементов могут также влиять условия окружающей среды и ландшафта

Влияние почвенных факторов на подвижность и биодоступность микроэлементов.

Soil Factor	Causal Process	Effect on Mobility/Bioavailability
Low pH	Decreasing sorption of cations onto oxides of Fe and Mn	Increase
	Increasing sorption of anions onto oxides of Fe and Mn	Decrease
High pH	Increasing precipitation of cations as carbonates and hydroxides	Decrease
	Increasing sorption of cations onto oxides of Fe and Mn	Decrease
	Increasing complexation of certain cations by dissolved ligands	Increase
	Increasing sorption of cations onto (solid) humus material	Decrease
	Decreasing sorption of anions	Increase
High clay content	Increasing ion exchange for trace cations (at all pH)	Decrease
High OM (solid)	Increasing sorption of cations onto humus material	Decrease
Competing ions	Increasing competition for sorption sites	Increase
Dissolved inorganic ligands	Increasing trace metal solubility	Increase
Dissolved organic ligands	Increasing trace metal solubility	Increase
Fe and Mn oxides	Increasing sorption of trace cations with increasing pH	Decrease
	Increasing sorption of trace anions with decreasing pH	Decrease
Low redox	Decreasing solubility at low redox potential as metal sulfides	Decrease

Так топография существенно влияет на развитие аномалий металлов в почве из-за её воздействия на поток грунтовых вод, богатых металлами, из минерализованных зон. Это может быть связано с тем, что уклон уровня грунтовых вод и последующий поток грунтовых вод обычно отражают уклон поверхности. Однако в непосредственной близости от водоразделов на движение грунтовых вод могут влиять и другие факторы, в том числе колебания уровня грунтовых вод в соседних бассейнах. В районах с низким рельефом, подверженных длительной эрозии, таких как ЗСВ, это может приводить к эпизодическому перемещению грунтовых вод, богатых металлами, независимо от рельефа местности. Базовые геохимические исследования почв в ЦАМП показывают, что аномальные концентрации металлов в свободно дренируемых почвенных горизонтах над максимальным уровнем грунтовых вод переносятся растительностью из более глубоких горизонтов.

О биодоступности металлов в растениях свидетельствует их растворимая фракция, несмотря на растущее понимание того, что существующие методы оценки растворимых и биодоступных фракций нуждаются в переоценке из-за их изменчивости в пространственно-временных масштабах. Химические методы экстракции остаются наиболее часто используемыми методами оценки биодоступной фракции металлов. Растворимое содержание металла и «слабо адсорбированное» содержание (т.е. обменное) являются хорошим

показателем количества металла, доступного для растений. Отдельные экстрагенты, включая CaCl_2 и $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, часто используются для извлечения обменных металлов из почвы, и эта обменная фракция может тесно коррелировать с поглощением растениями.

3.5. Геохимия растительности и ее использование в качестве среды для отбора проб.

Растения поглощают и перерабатывают широкий спектр элементов из грунтовых вод или минеральных поверхностей, накапливая одни элементы и исключая другие. Биологически важные элементы (P, Ca, K, Mg, Na, S, Cu, Fe, Mo, Se и Zn) избирательно поглощаются растительностью. Полезные и второстепенные элементы, в том числе потенциально токсичные, также поглощаются и могут отражать состав почвы и реголита. Медь является важным микроэлементом для растений, входящим в состав белков ряда ферментов, которые отвечают за перенос электронов и окислительно-восстановительные реакции в растительных органеллах, включая митохондрии, хлоропласты, клеточные стенки и цитоплазму растительных клеток. Белки, содержащие медь, также играют важную роль в метаболизме углеводов и азота, а также в лигнификации клеточных стенок. Растения обычно поглощают медь из почвы в форме Cu^{2+} , так как она легко связывается с органическими веществами по сравнению с другими соединениями меди. Поскольку медь является питательным веществом для растений, её содержание в большинстве растений, как правило, регулируется изнутри, а не извне. Таким образом, концентрация меди в большинстве растений ниже, чем в почве, в которой они растут (табл. 3), за исключением тех, которые произрастают на минерализованных участках.

Табл. 3.

Средние концентрации элементов (мгКг^{-1}) в горных породах, почвах и растительности.

	Co	Cr	Cu	Pb	Mn	Ni	Zn
Earth's crust	25	100	55	13	950	75	70
Granite	3	20	13	48	195	1	45
Basalt	47	114	110	8	1280	76	86
Ultramafic rocks	150	1600	10	1	1620	2000	50
Soils (non-ultramafic)	10	60	20	10	850	40	50
Soils (ultramafic)	250	2500	20	10	1000	2500	40
Vegetation (non-ultramafic)	1	1	10	10	80	2	100
Vegetation (ultramafic)	10	10	10	10	100	80	100

Концентрация Cu, необходимая для нормального роста растений, колеблется в пределах 5-20 мгКг^{-1} . Дефицит и токсичность могут рассматриваться как концентрации ниже или выше указанного диапазона. Однако верхние пороговые значения, свидетельствующие о значительной биоаккумуляции, могут варьироваться в зависимости от геологических условий и от концентрации Cu в почве. В минерализованных районах концентрация Cu в растениях значительно возрастает до такой степени, что растение может не переносить таких суровых эдафических условий. В отличие от Cu, концентрации Co в растениях, как правило, сильно

коррелируют с химическим составом почвы, поскольку обычно он не рассматривается как необходимая пищевая потребность, хотя и может оказывать благотворное воздействие.

Флористический состав отражает доступность элементов в корнях и способность растения поглощать, переносить и накапливать элементы. Растения, устойчивые к повышенным концентрациям металлов, реагируют тремя механизмами, а именно; исключение, индикация и гипераккумуляция. Исключающие факторы ограничивают перенос металлов в надземную биомассу и поддерживают относительно низкие концентрации металлов в листьях в широком диапазоне концентраций металлов в почве. Индикаторные виды растений имеют тенденцию к перемещению и накоплению металлов в надземных органах растений. Концентрация металлов в этих растениях отражает химический состав почвы, а соотношение концентрации металлов в растениях и почве относительно постоянное и демонстрирует линейную зависимость. Гипераккумуляторы демонстрируют чрезмерное поглощение металлов и их транслокацию в побеги. Идентификация растений-эксклюзив, индикаторов и гипераккумуляторов обычно зависит от сравнения концентрации металла в растении с общей концентрацией металла в почве. Концентрации Cu в растениях- индикаторах и гипераккумуляторах находятся в диапазоне 30-500 мгКг⁻¹, но это может варьироваться в зависимости от подстилающих пород и состава почвы.

Поглощение металлов растительностью может зависеть от элемента, вида растения и растительной ткани. Концентрации металлов в растениях обычно варьируются среди видов растений. Концентрация, перенос и накопление металлов из почвы в корни и побеги оцениваются на основе биологических коэффициентов концентрации (BCF). BCF рассчитывается как отношение содержания металлов в корнях растений к содержанию в почве и является полезным показателем потенциала фиторемедиации. Таким образом, поглощение металлов ограничено факторами биоконцентрации отобранных видов растений с использованием уравнения (1).

$$\text{Bioconcentration Factor (BCF)} = \frac{C_{\text{metal in plant}}}{C_{\text{metal in soil}}} \quad (1)$$

Коэффициенты биоконцентрации металлов - это индексы, которые используются для определения способности видов растений концентрировать интересующие металлы в почвах и подстилающих минерализованных породах. Виды растений с BCF > 1 могут быть растениями-аккумуляторами или гипераккумуляторами и могут указывать на потенциал минерализации. При поисках ПИ систематический отбор проб почвы и растительности остается важным для определения того, обусловлены ли факторы высокой биоконцентрации естественным обогащением металлами или просто следствием антропогенной деятельности.

В ЦАМП в ходе исследований было выявлено несколько видов индикаторов меди и кобальта. Несмотря на то, что в растениях были обнаружены металлы и их соединения, независимые геологические и фитогеохимические факторы, лежащие в основе взаимосвязи между видами растений и минерализованными участками, не были полностью описаны. Это открывает возможности для использования фитогеохимии в качестве потенциального метода поисков.

Отбор проб растений и почвы и их анализы.

Фитогеохимия при поисках зависит от взаимосвязи между растениями и почвой. Это связано с тем, что растения не могут получить доступ ко всему запасу металлов, имеющемуся в почве. Таким образом, для оценки геохимических форм меди и кобальта в ризосфере и их влияния на биодоступность металлов требуется систематический отбор проб растений и почвы. Фитодоступность металлов сильно зависит от вида растения и свойств почвы, которые контролируют подвижность и биодоступность металлов в почвенном растворе. Си и Со имеют сильное сродство к почвам с глинистыми и органическими составляющими, поскольку они снижают подвижность элементов. Си в почвенном растворе также может находиться в соединении с другими лигандами, такими как NH_3 , $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$, SO_4^{2-} , OH^- , Cl^- . Распределение металлов в почвах также зависит от pH почвы. Изменения в распределении металлов считаются основным показателем изменения подвижности и биодоступности металлов в почвенно-растительных системах.

Таким образом, при фитогеохимических исследованиях систематически отбираются пробы как растений, так и почвы с использованием регулярной сетки. Подход, применяемый при отборе проб растительности, представляет собой квадратичный количественный экологический метод, в котором для деревьев, кустарников и травянистой растительности берутся квадраты разного размера, включая 100 м^2 , 25 м^2 и 1 м^2 соответственно. У каждого из отобранных видов собраны различные органы растений, включая корни, стебли и листья. Пробы почв отбираются с использованием традиционного почвенного геохимического отбора проб, ориентированного на горизонт В. Кроме того, берутся пробы почв, извлеченных из корней растений, для определения потенциального обогащения металлами по сравнению с фоновыми концентрациями в почве.

Полевые образцы обычно анализируют на наличие различных физико-химических свойств, включая электропроводность почвы (ЕС), pH, общее содержание растворённых твёрдых веществ (TDS) и текстурные характеристики, то есть является ли почва песчаной, илистой или глинистой. Перед химическим элементным анализом образцы растений и почвы гомогенизируют. Растения измельчают до состояния золы, а почву просеивают до размера

частиц 76 микрон, поскольку многоэлементный анализ таких мелких фракций может выявить важные геологические и геохимические процессы. Многоэлементный анализ почвы и растений проводится с помощью рXRF. Это позволяет быстро получать геохимические результаты, даже если концентрация некоторых микроэлементов в образцах очень низкая и находится за пределами обнаружения. Однако современные достижения в области аналитических технологий, в том числе атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС), микро-PIXE (спектроскопия рентгеновской флуоресценции, индуцированной частицами), сканирующая электронная микроскопия с энергодисперсионной спектрометрией (СЭМ-ЭДС), масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС), Qemscan и лазерная абляция минералов (ЛАМ), позволяют проводить элементный и минеральный анализ образцов почвы и растений. Эти современные приборы потенциально могут решать аналитические задачи, связанные с растительными тканями, которые, как правило, накапливают очень низкие концентрации химических элементов. Кроме того, исследования, проведённые на гербарных образцах *Haumaniastrum* в ЦАМП с использованием СЭМ-ИСП, позволяют успешно различать виды Си и Со, вызванные поверхностным загрязнением внутренних структур растений. Однако в этих исследованиях также отмечается отсутствие стандартных протоколов обеспечения и контроля качества при отборе проб растительности, а также сложности в анализе и интерпретации данных, полученных из собранных образцов.

4. Методы оценки использования растений для выявления месторождений.

Наиболее эффективный подход к оценке использования растений при поисках скрытых рудных месторождений зависит от использования нескольких инструментов оценки, которые могут быть сгруппированы в соответствии с геохимической оценкой и оценкой металлофитов, как показано на рисунке 7.

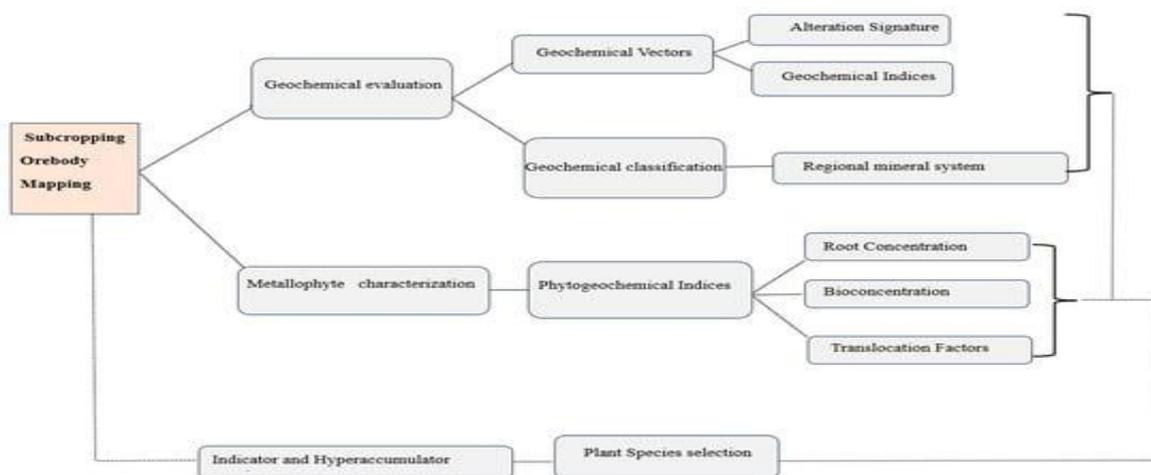


Рис. 7. Концептуальные основы использования растений при поисках месторождений.

Геохимическая оценка при поисках ПИ фокусируется на выявлении химических градиентов, которые демонстрируют пространственную непрерывность и связаны с процессами изменений и минерализации. Интерпретация геохимических данных выявляет крупномасштабные закономерности, которые определяют направления геологических и геохимических процессов, которые, возможно, привели к сохранению рудного тела, включая зоны обогащения металлом и истощения. Эффективная и надежная интерпретация геохимических данных обычно выявляет линейные зависимости, которые могут отражать стехиометрию породообразующих минералов и последующие процессы, изменяющие структуру минералов, включая гидротермальные изменения, выветривание и взаимодействие флюида и породы.

Однако геологические и геохимические процессы регионального и локального масштаба также могут быть выявлены с помощью геохимических индексов. Эти индексы полезны для отличия отрицательных и несущественных аномалий от положительных аномалий, связанных с минерализованными зонами. Например, индексы отношения скандия к меди (Sc/Cu) используются для нормализации геохимических данных и подтверждения нанесенных на карту аномальных объектов. Кроме того, типы рудных месторождений характеризуются уникальными скоплениями элементов, и, следовательно, ассоциации элементов, выявленные по геохимическим показателям, могут указывать на источники металлов и природу минерализующих флюидов. В геохимических исследованиях окружающей среды геохимические индексы включают индекс геонакопления (I_{geo}) и факторы загрязнения (CFS), и они сосредоточены на повышенных концентрациях металлов из антропогенных источников.

Однако обогащение почв и реголита металлами влияет на виды растений независимо от того, происходит ли это из-за естественных или антропогенных источников. Способность растений накапливать металлы из почвы можно количественно оценить с помощью коэффициентов накопления металлов. Коэффициенты переноса металлов определяются как отношение концентрации металлов в растении к их концентрации в почве. Такие фитогеохимические показатели позволяют оценить перемещение металлов из почвы в растения. На рисунке 7 приведены три фитогеохимических показателя, которые важны для характеристики металлофитов. Коэффициент концентрации в корнях (RCF) — это отношение концентрации металла в корнях к концентрации кислоторастворимых металлов в почве. Способность растения переносить металлы из корней в листву измеряется с помощью коэффициента переноса (TF), который представляет собой отношение концентрации металла в листве к концентрации металла в корнях. Растения, которые поглощают и накапливают металлы, как правило, имеют высокие значения RCF и TF. Металлофиты с высокими

значениями RCF и TF полезны при поисках месторождений. Такие растения накапливают и переносят металлы из зон минерализации в свои корни, а затем в надземную биомассу. Выбор таких видов-аккумуляторов и гипераккумуляторов важен для поиска ПИ и может быть осуществлён путём сопоставления геохимических факторов с результирующими фитогеохимическими показателями.

4.1. Металлофиты ЦАМП.

В ходе исследований было выявлено несколько видов растений, демонстрирующих устойчивость к Cu и Co (табл. 4).

Табл. 4.

Виды растений-гипераккумуляторов Cu и Co в ЦАМП
(значения в $мгКг^{-1}$ сухой массы).

Species	Cu	Co
<i>Aeolanthus biformifolius</i>	3920	2820
<i>Annona senegalensis</i>	2889	2650
<i>Ascolepis metallorum</i>	1200	-
<i>Buchnera henriquesii</i>	3520	2435
<i>Bulbostylis mucronata</i>	7783	2130
<i>Becium homblei</i>	2051	-
<i>Crotalaria cobalticola</i>	-	3010
<i>Guternbergia cupricola</i>	5095	2309
<i>Haumaniastrum Katangese</i>	8356	2240
<i>Haumaniastrum robertii</i>	8500	4000
<i>Haumaniastrum rosulatum</i>	1089	-
<i>Ipomoea alpina</i>	12,300	-
<i>Lupinus perennis</i>	9322	2300
<i>Rendlia cupricola</i>	1560	-
<i>Parinari curatellifolia</i>		

Среди них *Annona senegalensis*, *Aeolanthus biformifolius*, *Silene cobalticola*, *Ascolepis metallorum*, *Crotalaria cobalticola* и *Haumaniastrum*. Род *Haumaniastrum* включает несколько видов, которые обычно произрастают на почвах с повышенными концентрациями Cu и Co, при этом один вид (*H. robertii*) произрастает только на месторождениях меди как в Замбии, так и в Демократической Республике Конго. О виде *Haumaniastrum robertii* сообщалось как о гипераккумуляторе Cu–Co на основе немых полевых образцов листьев с аналитическими результатами до 8500 мгКг^{-1} Cu и 4000 мгКг^{-1} Co. Однако такие повышенные концентрации также могут быть объяснены переносимой ветром пылью, содержащей медь и кобальт, из почв, богатых металлами. Другим видом рода *Haumaniastrum*, который продемонстрировал свойства гипераккумуляции, является *Haumaniastrum Katangese*, который накапливает меньше Co (до 864 мгКг^{-1}), но больше Cu по сравнению с *Haumaniastrum robertii*.

Экспериментальная работа дополнила некоторые полевые экологические исследования, в ходе которых растения двухмесячного возраста, собранные из семян, подвергались воздействию растворимых солей Cu и Co, смешанных с почвой, и использовались для имитации

природных условий. Результаты этих экспериментов показывают, что *H. Robertii* может быть устойчив к концентрациям Cu и Co в почве до 8500 мгКг⁻¹ и 4000 мгКг⁻¹ соответственно. Другие купрофиты, которые, как известно, произрастают почти исключительно на богатых металлами почвах с повышенной концентрацией Cu, включают виды *Becium metallorum* (Duvign), *Becium Homblei* (de Wild) и различные виды *Icomum*. Однако виды *H. robertii*, *H. Katangese* и *Becium Homblei*, вероятно, являются наиболее известными видами растений-индикаторов Cu–Co. Полевые экологические исследования вида *Becium Homblei* показывают, что он может быть устойчив к концентрациям Cu и Ni в почве до 15 000 мгКг⁻¹ и 5000 мгКг⁻¹ соответственно. Следовательно, *Becium Homblei*, представитель семейства губоцветных (Labiatae), обычно используется геологами Замбии в качестве геоботанического индикатора, хотя его фитогеохимическое значение остается неясным.

Хотя *Becium Homblei* был связан с повышенными концентрациями меди в почве и низкорослой растительностью, обычно называемыми “медными полянами” в Замбии, кампании геохимических исследований не были нацелены на отбор проб и анализ этих видов растений. Были выделены *Annona senegalensis*, *Parinari curatellifolia* и *Dombeya rotundilifolia* как местные виды деревьев в ZCB, обладающие способностью накапливать Cu и Co в тканях своих побегов. Тем не менее, чтобы использовать фитогеохимию при поисках полезных ископаемых, должен быть четкий геохимический след растений, отражающий процессы рудообразования и возможное сохранение рудного тела, но информация о таких взаимосвязях, которая была бы полезна при применении фитогеохимии, в настоящее время ограничена.

4.2. Комплексные подходы к исследованию фитогеохимии.

Современные достижения в области дистанционного зондирования и методов машинного обучения предполагают многообещающие возможности для интеграции фитогеохимии в комплекс поисковых методов регионального и локального масштаба. Гиперспектральные данные локального и регионального масштаба могут обнаруживать спектральные изменения растительности, которые могут указывать на присутствие рудного месторождения и элементов-спутников. Гиперспектральное дистанционное зондирование измеряет излучаемую и поглощаемую энергию на сотнях узких и спектрально смежных длинах волн. Гиперспектральное дистанционное зондирование может охватывать различные оптические области, такие как видимая (VIS; 400-700 нм), ближняя инфракрасная (NIR; 700-1200 нм), коротковолновая инфракрасная (SWIR; 1000-2500 нм), средневолновая инфракрасная (MWIR; 3000-7000 нм) и длинноволновая инфракрасная (LWIR; 7000-13000 нм). Видимые области электромагнитного спектра позволяют обнаруживать и идентифицировать гидратированные минералы. Растительность обычно демонстрирует спектральный отклик благодаря сочетанию

морфологических параметров, таких как структура растительного полога, площадь листьев и химические свойства, такие как содержание воды, хлорофилла, азота и следовых концентраций металлов. Микроэлементы даже при низких концентрациях все еще могут вызывать незначительные изменения спектральной характеристики растительности в областях VIS и SWIR электромагнитного спектра. Дистанционное зондирование обеспечивает экономичный и результативный подход к поискам, позволяющий полностью охватить земную поверхность в пространстве, однако его интеграция с фитогеохимией требует дополнительных переменных окружающей среды, включая типы почв, топографию, биотические и абиотические взаимодействия. Кроме того, следует рассмотреть исследования чувствительности, полученные с помощью дистанционного зондирования, чтобы понять недостатки и эффекты различных методов сбора и обработки данных.

Новые технологии, такие как машинное обучение (ML) и глубокое обучение (DL), привлекают всё больше внимания и совершают революцию в интеграции данных из различных источников в различных областях. Методы машинного обучения достигли существенных результатов в регрессионной оценке биогеофизических параметров по данным дистанционного зондирования в локальном и региональном масштабах. Эти подходы делают акцент на пространственном прогнозировании и могут быть полезны при интеграции и применении фитогеохимии при поисках ПИ. Несколько алгоритмов машинного обучения, в том числе K-ближайших соседей (KNN), линейная регрессия (LR), случайный лес (RF), метод наименьших квадратов и оператор выбора (LASSO), метод опорных векторов (SVM), регрессия опорных векторов (SVR) и дерево решений (DT), использовались для моделирования фиторемедиации и прогнозирования биоаккумуляции тяжелых металлов в почвенно-растительных системах. Что касается геохимического моделирования, то большинство исследований были сосредоточены на моделировании накопления металлов в почвах или водоемах в сочетании с географической информацией и поведением адсорбции металлов на основе данных, извлеченных из литературы. Методы машинного обучения продемонстрировали высокую точность прогнозирования и могут быть полезны при интеграции фитогеохимических данных при поисках ПИ. Кроме того, методы глубокого обучения расширяют границы знаний, используя искусственные нейронные сети (ИНС), свёрточные нейронные сети (CNN) и свёрточную долговременную кратковременную память (Conv LSTM) для извлечения глубинных характеристик из сложных наборов данных из нескольких источников с помощью множественного обучения ядрам и, следовательно, обеспечивают более высокую точность и возможности прогнозирования.

Несмотря на преимущества ML и DL, по-прежнему необходимо решить ряд проблем для достижения наилучшей производительности и прогностической способности моделей, включая недостаточные или неподходящие выборки обучающих данных, расхождения в данных из-за различных экспериментальных методов и неправильного выбора входных переменных. Недостаточный ввод характеристик может привести к низкой точности прогнозирования и упустить важные факторы, которые имеют отношение к точному прогнозированию модели. Следовательно, при использовании алгоритмов ML и DL для пространственного прогнозирования накопления металла в растениях, связанных с рудными месторождениями, необходимо учитывать все переменные, влияющие на накопление металла в растениях.

5. Проблемы и возможности применения фитогеохимии.

Несмотря на узкие места в использовании фитогеохимии в ГРР в ЦАМП, несколько возможностей предоставляют достаточно возможностей для отбора проб видов растений для определения целей геохимических исследований в регионе. Далее приведены некоторые из существующих проблем и возможностей для выведения видов, специфичных для конкретного участка, и видов-кандидатов, предназначенных для фитогеохимических исследований в Центральном-Африканском медно-кобальтовом поясе.

Проблемы:

На основе обзора литературы приведены проблемы, связанные с использованием геохимического отбора проб видов растений при поисках ПИ и они должны выполняться с учетом условий конкретного участка.

Основные проблемы включают:

(1) Отсутствие статистических и пространственных взаимосвязей между элементами-индикаторами и ориентирами на местности, где проводился отбор проб геохимических видов растений, поскольку большинство исследований характеризуют накопление металлов в растениях на основе одноэлементных концентраций, а не с учетом многоэлементного подхода. Однако идеальное растение, полезное в качестве индикаторного вида должно быть способно переносить и накапливать ряд металлов, поскольку вторичные геохимические проявления минеральных систем, включая содержания Cu-Co в отложениях, как правило, демонстрируют уникальные кластеры ассоциаций элементов. В настоящее время в ЦАМП не известно растений, соответствующих этим критериям.

(2) На содержание металлов в наземных растительных экосистемах влияют сложные взаимодействия между корнями растений и почвенными микробными сообществами в ризосфере. Эти взаимодействия и их влияние на доступность меди и кобальта для растений в

настоящее время плохо изучены в ЦАМП и, следовательно, требуют передовых исследований с применением современных методов. Однако в некоторых горнодобывающих районах, в том числе в развивающихся странах, таких как Замбия и Демократическая Республика Конго, могут наблюдаться проблемы с ресурсами и инфраструктурой, что затрудняет сбор достоверных данных, обработку и обмен воспроизводимыми результатами исследований.

(3) Ограниченное количество междисциплинарных исследований, проводимых экспертами-геофизиками, геохимиками и систематиками растений, влияет на качество фитогеохимических данных. Сложность заключается в том, чтобы отличить естественное накопление от загрязнения, а также в точной идентификации видов растений, поскольку на одном участке исследования может произрастать несколько видов. Таким образом, становится сложно определить геохимический контраст, связанный с месторождением ПИ.

(4) Отсутствие четких протоколов обеспечения качества, включая использование стандартов и дубликатов, является еще одной серьезной проблемой, связанной с использованием геохимии наземных растений при разведке ПИ, поскольку в большинстве исследований прямо не указано, каким образом фитогеохимические данные проверялись на точность. Кроме того, способность определенных растений расти как на минерализованных, так и на неминерализованных участках затрудняет точный отбор дубликатов и таким образом, влияет на достоверность наборов данных по фитогеохимии.

(5) Фитогеохимию невозможно выполнить самостоятельно, поскольку на накопление металлов в растениях всегда влияют свойства почвы, включая растворимость и биодоступность металлов для усвоения растениями из почвы. Кроме того, при отборе проб растительности следует учитывать несколько факторов. К ним относятся распределение видов растений и пригодность структуры корней, различия в концентрациях элементов в различных органах растений, а также возраст и состояние здоровья отбираемого растения. Другим важным фактором является влияние сезонности на химические структуры, особенно на поглощение воды растениями, которые могут разбавлять определённые элементы в сезон дождей и концентрировать их в сухой сезон.

(6) Минералогия подстилающих пород может влиять на биодоступность Cu–Co для поглощения наземными растениями, поскольку богатые глиной породы, такие как сланцы и алевролиты, обладают более высокой способностью удерживать металлы по сравнению с кварцево-полевошпатовыми и карбонатными породами. Это может приводить к очень низким концентрациям микроэлементов в растениях и, следовательно, требует применения передовых аналитических технологий для выявления геохимических признаков в растениях, которые указывают на наличие ПИ.

Возможности:

Несмотря на проблемы, существует несколько возможностей для внедрения и интеграции отбора образцов растений в геохимические поиски в ЦАМП. К таким возможностям относятся:

(1) Большое разнообразие растительных сообществ и видовое богатство ЦАМП обусловлены его сложным и разнообразным геологическим строением. Это разнообразие и богатство растений может быть использовано при отборе видов-кандидатов, демонстрирующих устойчивость и накопление ряда элементов в их подземной и/или надземной биомассе при геохимических аномальных концентрациях.

(2) Распознавание растений, колонизирующих минерализованные участки и пустоши, образованные добычей полезных ископаемых, в ЦАМП, включая их анализ на накопление Cu–Co, представляет исходные данные, и, таким образом, фитогеохимия может использовать такие виды при моделировании геохимических закономерностей от заброшенных месторождений или известных минерализованных участков до новых участков, которые не пострадали от добычи полезных ископаемых.

(3) Успешное применение гипераккумуляторов для фиторемедиации открывает возможности для использования многоэлементной фитогеохимии при отборе видов растений-индикаторов в качестве переносчиков в минерализованные зоны.

(4) Современные достижения в области многомерного анализа биогеохимических данных и применение подходов, основанных на данных, таких как машинное обучение и алгоритмы глубокого обучения, для прогнозного картирования и выбора видов-индикаторов, создают основу для повышения потенциала фитогеохимии при поисках.

(5) Использование междисциплинарных исследований, объединяющих биологическую, химическую и геологическую информацию, должно способствовать более широкому применению фитогеохимии при поисках полезных ископаемых.

6. Выводы и направления будущих исследований.

1. Разнообразное геологическое строение ЦАМП предполагает разнообразную литогеохимию и почвенную геохимию, которые в конечном итоге влияют на флористический состав региона. Это дает широкий выбор подходящих для конкретного участка видов растений, которые имеют специфические особенности реакции на определенные типы минерализации и накапливают ряд микроэлементов. Несмотря на высвобождение ряда микроэлементов и ионов металлов во время выветривания горных пород Катангана, их формирование в системах почва-растение обусловлено несколькими геохимическими процессами, включая ионный обмен (адсорбция-десорбция), солубилизацию и абсорбцию. На эти процессы влияют различные

геохимические факторы, включая рН, Eh, органические вещества, способность к катионному обмену и оксиды Fe, Mn и Al. Эти геохимические факторы играют важную роль в контроле подвижности микроэлементов, их биодоступности и усвоения в системах почва-растения. Кроме того, другие физико-химические свойства элементов, такие как электроотрицательность и ионный потенциал, влияют на фитогеохимическое поведение металлов. Концентрация, перемещение и накопление микроэлементов из почвы в органы растений определяется количественно с использованием биологических коэффициентов концентрации, а виды растений с $BCF > 1$ являются гипераккумуляторами и были определены как потенциальные виды-индикаторы для фитогеохимических поисков рудных месторождений.

2. Однако фитогеохимия требует комплексного подхода при поисках из-за сложных биотических и абиотических взаимодействий в наземных растительных экосистемах. Новые технологии, такие как гиперспектральное дистанционное зондирование, машинное обучение и методы глубокого обучения, открывают несколько возможностей для интеграции фитогеохимии в комплекс методов ГРП. Эти подходы обеспечивают потенциальные преимущества с точки зрения интеграции данных из нескольких источников, точности и эффективности прогнозирования месторождений полезных ископаемых.

3. Поскольку стоимость ГРП растёт, а вероятность обнаружения рудных месторождений, особенно «скрытого типа», снижается, возникает острая необходимость в разработке новых эффективных и недорогих методов поисков. Фитогеохимия является одним из таких потенциальных методов. Кроме того, во всём мире растёт интерес к малозатратным и экологичным технологиям, которые делают акцент на отборе образцов растений в качестве потенциального критерия для определения целей. Для оценки их полезности потребуются дополнительные исследования, направленные на выявление целевых видов и определение точных методов отбора образцов. Для оценки реальных перспектив фитогеохимии необходимы целенаправленные междисциплинарные исследовательские проекты, ориентированные на эти виды и объединяющие данные из разных источников.

4. Химический анализ видов металлофитов в ЦАМП указывает на их пригодность для фиторемедиации деградировавших ландшафтов и, следовательно, может быть полезен при поиске ПИ, хотя эти анализы ограничиваются определением содержания меди и кобальта. Таким образом, фитогеохимическая разведка должна перейти к многоэлементному и стабильному изотопному анализу растительных тканей, чтобы выявить минерализацию в пространственно-временных масштабах. Такие наборы данных по фитогеохимии позволят установить связи между геологическими и геохимическими переменными в минерализованных системах, а стабильные изотопы также могут служить индикаторами наблюдаемых

концентраций металлов в растительной среде. Кроме того, анализ химических компонентов древесных колец может оказаться полезным для получения пространственно-временных геохимических данных, и эти наборы данных могут определять региональные и локальные геохимические пороговые значения и учитывать антропогенный вклад фоновых источников при интерпретации фитогеохимических данных при поисках ПИ. Кроме того, отсутствует согласованность в отношении типа (ов) органов растений, подлежащих отбору проб в ходе фитогеохимических исследований, поскольку в некоторых исследованиях отбирались пробы корней, стеблей и листьев, в то время как в других исследованиях отбирались пробы только листвы. Следовательно, необходимо определить рекомендации по отбору проб для эффективного применения фитогеохимии при поисках ПИ.

V. ФИТОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ СКРЫТОГО W-Sn ОРУДЕНЕНИЯ (рудный район Шичжюань, провинция Хунань, Китай) [6].

1. Введение.

Традиционные методы геохимических поисков не всегда эффективны при выявлении глубоко скрытых рудных объектов, тогда как фитогеохимические методы имеют явные преимущества. Корни растений могут проникать в мощные перекрывающие слои, поглощая воду, питательные вещества и минеральные элементы глубоко под землей, тем самым генерируя сигналы геохимических аномалий, которые дают ценную информацию о местонахождении рудных тел. Этот метод позволяет избежать необходимости обширной зачистки почвы или бурения, что делает его одновременно экологически чистым и экономически эффективным. Кроме того, обширная корневая система растений может указывать на присутствие рудных тел на гораздо более обширной территории. Фитогеохимические методы представляют собой потенциально эффективный подход, который уже успешно применяется при поиске скрытых месторождений в различных странах и регионах, демонстрируя уникальные преимущества. Было проведено пилотное исследование одновременных поисков с использованием как геохимии почвы, так и растений в одном из рудных районов Австралии. Результаты показали, что почва демонстрирует слабые и неоднозначные сигналы минерализации, в то время как *Акация беловатая* продемонстрировала сильные сигналы многоэлементной минерализации из-за поглощения подвижных минерализованных элементов. Например, концентрация цинка в листьях была на 29 ppm, а в корнях — на 35 ppm выше, чем фоновый уровень минерализации. *Толокнянка обыкновенная* L. (*карликовый кустарник, произрастающий над месторождением золота и меди Юомаусо в Финляндии*) предоставил геохимические данные, потенциально указывающие на наличие оруденения на глубине более 200 м. В районе полуострова Йорк в Южной Австралии был проведен крупномасштабный региональный отбор проб для анализа концентрации меди в листьях *эвкалиптов Малли*. Исследование выявило аномально высокие концентрации меди (6–10,04 ppm) в листьях в радиусе 3 км от известных месторождений меди. В ходе исследования месторождения Твин-Лейкс в Канаде были использованы фитогеохимические и многомерные статистические методы для оценки закономерностей распределения различных минеральных элементов в образцах *сосны Марианской*. Были обнаружены средние концентрации 2100 ppm Zn, 81 ppm Cu и Au в диапазоне от 0,2 до 303 частей на миллиард, что значительно превышает фоновый уровень. Самые высокие концентрации элементов наблюдались в растениях, расположенных непосредственно над минерализованными участками. Исследование,

проведённое на юге Норвегии, выявило отчётливый сигнал в растительности, покрывающей залежи свинца и молибдена, и определило *берёзу и карликовый кустарник Vaccinium vitis-idaea* как наиболее эффективные виды для биогеохимических поисков. Значительный прогресс был достигнут в фитогеохимических исследованиях в Китае, которые проводились в основном на известных месторождениях, расположенных в пустыне Гоби, в ледниковых отложениях на северо-западе Китая и в южных регионах с хорошо развитыми красными почвами, пышной растительностью и ограниченными коренными обнажениями горных пород. Геохимические аномалии, создаваемые распространёнными растениями, такими как *Seriphidium terrae-albae*, над рудными месторождениями металлов в пустынных районах на севере Восточного Джунгара, могут точно указывать на скрытое оруденение. В горнорудном районе Гьябджека, северная *Rhododendron nivale* показал аномальные пиковые значения для Li, Be, Rb, Cs и W, достигающие $5,25 \times 10^{-9}$, $13,62 \times 10^{-9}$, $34,66 \times 10^{-9}$, $1,00 \times 10^{-9}$ и $0,43 \times 10^{-9}$ соответственно. Эти ярко выраженные аномалии элементов минерализации эффективно указывают на наличие скрытых рудных тел на разной глубине.

В рудном районе Шичжюань провинции Хунань были выбраны три доминирующих вида растений: *Artemisia argyi*, *Maesa japonica* и *Dicranopteris dichotoma* для анализа их характеристик поглощения и обогащения микроэлементами в различных частях растений. Для оценки эффективности этих растений в качестве индикаторов оруденения использовались многомерные статистические методы, включая кластерный анализ R-типа и факторный анализ. Целью исследования было определить наиболее подходящие растения-индикаторы, проверить применимость фитогеохимических методов и предложить новые подходы для поисков глубоко скрытых месторождений в районе Шичжюань и аналогичных регионах.

2. Материалы и методы.

2.1. Описание района исследований.

Ранние данные указывают на наличие скрытых полиметаллических рудных тел Pb–Zn–Ag, предполагая, что это потенциальный район для поисков. Почва на исследуемой территории представляет собой почву *in situ*, в основном состоящую из красной почвы, с pH от 4,6 до 6,8. Растительный покров превышает 95% площади, в основном включая семейство *Compositae*, за которым следует семейство *Pteridaceae*. В регионе произрастает множество однолетних, многолетних травянистых растений и кустарников. Ключевые местные виды растений включают *Artemisia argyi*, *Dicranopteris dichotoma*, *Cynodon dactylon*, *Pinus massoniana* и *Maesa japonica*. Установлено, что *A. Argyi* и *D. Dichotoma* обладают наибольшими способностями к поглощению и накоплению тяжелых металлов. Кроме того, *M. Japonica* наиболее широко

распространен и имеет глубоко укоренившуюся систему. Эти три вида были использованы для отбора проб.

Геологические образования района Шичжуйюань преимущественно состоят из карбонатных пород верхнего девона и представлены известняками, микритовыми доломитами, доломитовыми известняками, а также конгломератами и песчаниками. Наиболее благоприятными рудовмещающими породами являются микритовые доломиты с вкраплениями глинистых полос. Ограниченное количество четвертичных отложений присутствует только в северной части района. Многочисленные NE-, NNE- и близкие к NS разломы определяют распределение гранитов и рудных тел (скарнов) (рис. 1). Гранитный плутон Цяньлишань возрастом 160-153 млн лет, занимающий площадь около 10 км², играет доминирующую роль в выявленной рудной (W–Sn) минерализации преимущественно скарнового и грейзенового типов, а также потенциального Cu, Pb, Zn и Ag гидротермального оруденения, возможно залегающего дистальнее от гранитоидов.

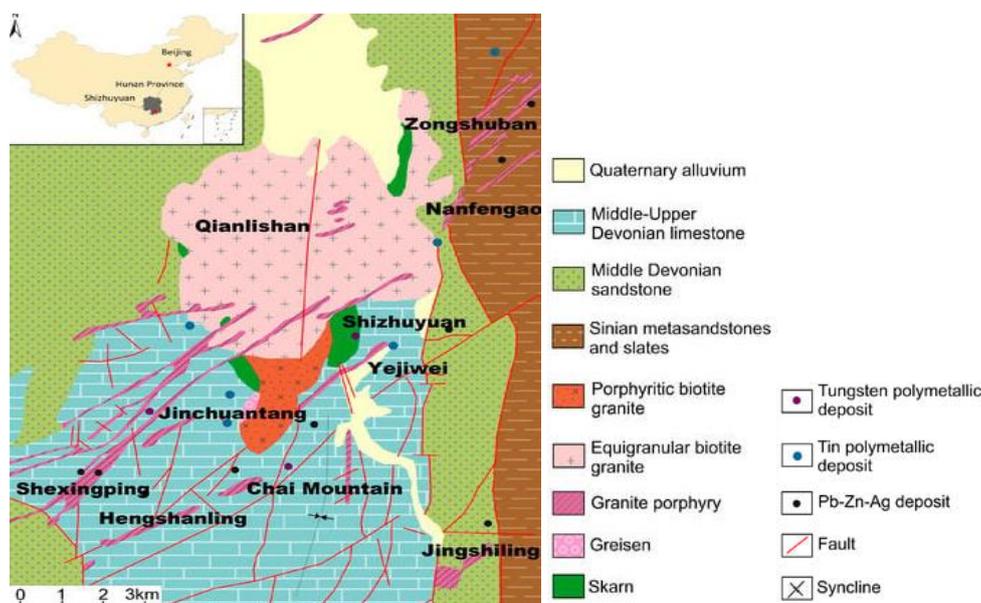


Рис. 1. Геологическая карта района Шичжуйюань.

2.2. Сбор, подготовка и анализ проб.

Точки отбора проб располагались на расстоянии 20 м друг от друга, и в каждой точке было собрано примерно по 300 г образцов. Всего было собрано 126 образцов с 28 участков, охватывающих площадь около 10 км². Это включало одновременный сбор образцов стеблей и листьев *M. japonica*, *A. Argyi* и *D. Dichotoma* в 8 местах, а также только образцов листьев этих трёх видов в ещё 20 местах. Двадцать четыре контрольных образца соответствующих растений были случайным образом собраны в отдалённом от известного оруденения участке. Образцы сначала промыли водопроводной водой, затем 3–5 раз ультрачистой водой и высушили при температуре 60°C. После этого их измельчили до размера частиц 0,2 мм.

Перед количественным анализом образцы обрабатывались методом мокрого разложения с использованием $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$. Примерно 0,2 г образца взвешивали в стакане на 50 мл и добавляли 10 мл смешанной кислоты ($V(\text{HNO}_3):V(\text{HClO}_4)=4:1$). Мензурку накрывали стеклом и давали настояться в течение 30 мин, а затем ставили на горячую плиту при температуре 175°C для переваривания, пока не выделялось большое количество белого дыма и дигестат не становился прозрачным и бесцветным. После завершения сбраживания раствор дополнительно нагревали для выпаривания кислоты до тех пор, пока в мензурке не оставалось 1-2 мл жидкости, а затем дигестату давали остыть до комнатной температуры. Затем дигестат переносили в мерную колбу объемом 25 мл, разбавляли до объема, тщательно перемешивали и оставляли настояться перед анализом. Все реагенты, использованные в эксперименте, были гарантированного качества (GR). Образцы, собранные в ходе этого исследования, были проанализированы в Государственной ключевой лаборатории изотопной геохимии Института геохимии Гуанчжоу Академии наук Китая. Исследованные микроэлементы включали Ag, As, B, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Th, Tl, U и Zn. Содержание каждого элемента определялось отношением массы элемента к сухой массе растения (мкг/г). Анализ проводили с использованием масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) (серия Thermo X, Уолтем, Массачусетс, США).

2.3. Контроль и оценка качества, анализ данных.

В процессе случайным образом были взяты четыре национальных стандартных образца растений и четыре дублирующих образца для контроля качества анализа.

Точность проверялась с использованием формулы $\Delta \lg C_j - \Delta \lg C_s \leq \pm 0.13$, где C_j и C_s представляют среднее значение n измерений и стандартное значение национального стандартного образца соответственно. Относительное отклонение массовой доли элементов между двумя анализами одного и того же образца должно соответствовать стандарту $RD \leq 20\%$.

Результаты этой проверки качества показали, что контрольные образцы соответствовали критериям предварительного тестирования, при этом относительное отклонение (RD) повторных измерений того же образца составляло от 0,2% до 3,5%, что соответствует стандарту $RD \leq 20\%$, что указывает на достоверность результатов тестирования.

(1) Нормализованные значения (Z) концентрации микроэлементов в тканях стебля и листьев растений были рассчитаны по следующей формуле:

$$Z = \frac{\omega_{stem/leaf}}{\omega_{stem} + \omega_{leaf}} \quad (1)$$

где $\omega_{\text{стебель/лист}}$ обозначает среднюю концентрацию элемента в образце стебля или листа растения.

(2) Коэффициент контрастности (K_{CD}), коэффициент обогащения (K_{NJ}) и коэффициент изменчивости (C_v) для микроэлементов в данных о растениях рассчитывались по следующим уравнениям:

$$K_{\text{CD}} = \frac{\omega_0}{\omega_b}$$

$$K_{\text{NJ}} = \frac{\omega_0}{\omega_g} \quad (2, 3, 4)$$

$$C_v = \frac{\sigma}{\omega_0}$$

где ω_0 - средняя концентрация элемента в образце растения, ω_b - средняя концентрация элемента в образцах растений контрольной зоны, σ - стандартное отклонение, а ω_g - глобальное эталонное значение для концентраций растительных элементов.

(3) Коэффициент биологического поглощения (X_{BAC}) для поглощения каждым элементом, поступающим в растение из почвы, выражается следующей формулой:

$$X_{\text{BAC}} = \frac{\omega_{\text{plant}}}{\omega_{\text{soil}}} \quad (5)$$

где $\omega_{\text{растение}}$ обозначает концентрацию элемента в растении, а $\omega_{\text{почва}}$ — концентрацию элемента в активной части почвы.

(4) Кластерный и факторный анализ 21 микроэлемента типа R позволил получить спектрограммы и матрицы ортогональных повернутых факторных нагрузок.

3. Результаты.

3.1. Характеристики микроэлементов в растениях.

Оптимальное положение для отбора проб различных растений.

Элементы, активно или пассивно поглощаемые растением из окружающей среды, мигрируют и накапливаются в его различных частях. Из-за различий в элементной активности, способности к миграции и органоспецифической переносимости распределение одного и того же элемента в разных частях растений различно. Во время фитогеохимических исследований определение оптимального места отбора проб имеет решающее значение для повышения точности и эффективности. Были проанализированы средняя концентрация (ω_0) и

коэффициент контрастности (K_{CD}) микроэлементов в тканях стеблей и листьев *A. argyi*, *M. Japonica* и *D. Dichotoma* из восьми участков в пределах исследуемой территории. Учитывая значительные различия в концентрациях 21 элемента, нормализация средних значений микроэлементов была необходима для простого построения графиков в программном обеспечении Origin 2022.

В *A. Argyi* значения ω_o 18 микроэлементов, за исключением Cd, Tl и Zn, были заметно выше в тканях листьев. В *M. Japonica* в тканях листьев значения ω_o Ag, As, B, Bi, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Sb, Se, Sn, Th, Tl и Zn были сравнительно выше, чем в тканях стебля. Аналогичным образом, в *D. Dichotoma* в тканях листьев были обнаружены более высокие значения ω_o для Ag, As, B и 19 других микроэлементов (рис. 2). Это говорит о том, что большинство микроэлементов преимущественно накапливаются в тканях листьев этих трёх растений. Хотя процентное содержание элементов в разных органах в некоторой степени влияет на результаты анализа, более высокий процент не обязательно означает, что растение подходит для отбора проб. Кроме того, для определения оптимальных частей растения, пригодных для отбора проб, необходимо учитывать значение аномалий содержания элементов в тканях.

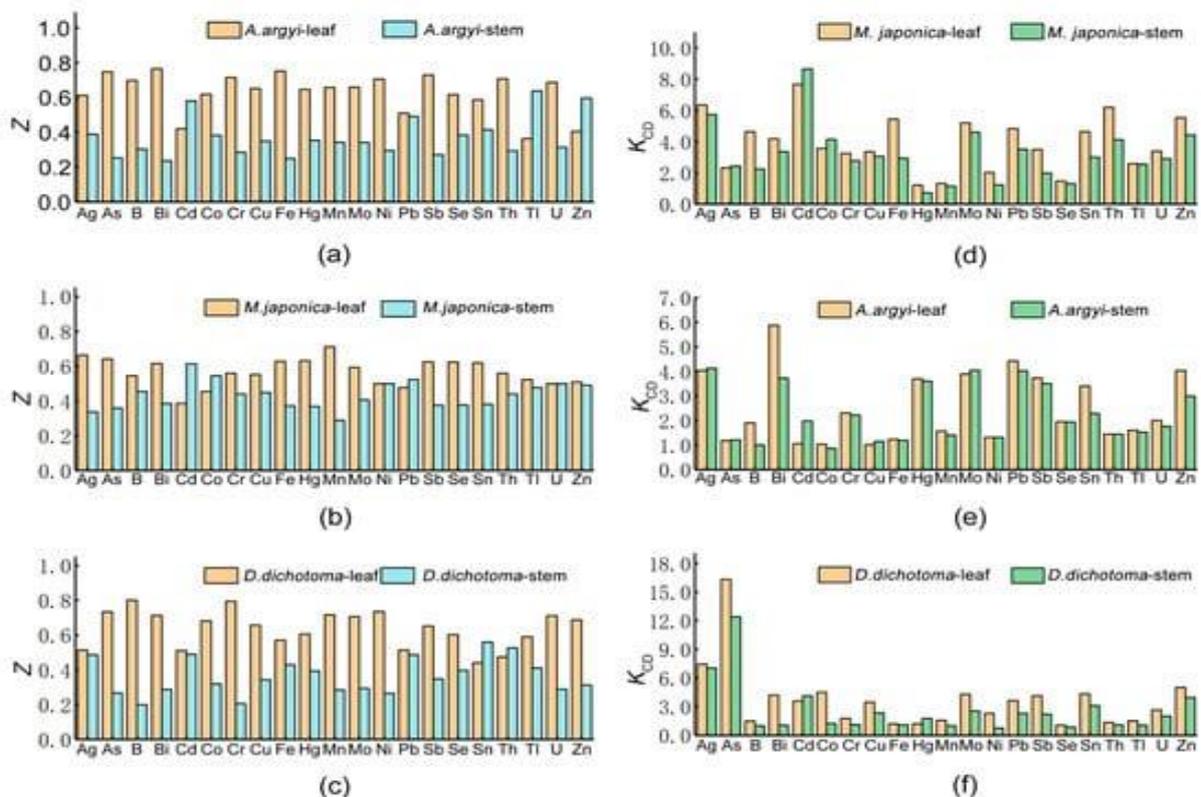


Рис. 2. Нормализованные значения (Z) микроэлементов в стеблевых и листовых частях *Artemisia argyi*(a), *Maesa japonica*(b) и *Dicranopteris dichotoma*(c) и коэффициенты контрастности отклонений (K_{CD}) микроэлементов в стеблевых и листовых частях *Artemisia argyi*(d), *Maesa japonica* (e) и *Dicranopteris dichotoma*(f).

По сравнению с тканями стебля, в тканях листьев *A. argyi*, *M. Japonica* и *D. Dichotoma* были обнаружены повышенные значения K_{CD} для 18, 15 и 18 микроэлементов соответственно. Это говорит о том, что большинство микроэлементов в листьях этих растений с большей вероятностью образуют отчётливые геохимические аномалии. Таким образом, листовые ткани *A. argyi*, *M. Japonica* и *D. Dichotoma* обладают выраженной способностью не только накапливать микроэлементы, но и создавать отчётливые геохимические аномалии, что делает их перспективными для индикации. Учитывая удобство и эффективность сбора образцов, листовые ткани считаются оптимальным материалом для изучения геохимических особенностей местных растений.

Особенности поглощения микроэлементов из почвы различными растениями.

При фитогеохимических поисках крайне важно выбирать растения с высокой способностью к обогащению целевыми элементами, поскольку эти растения обычно демонстрируют ярко выраженный контраст, эффективно отображая аномалии по сравнению с фоновыми уровнями. Коэффициент биологического поглощения (X_{BAC}) определяется как отношение концентрации элементов в листьях к концентрации в почве, что указывает на степень миграции элементов из почвы в растение. Этот коэффициент отражает способность или склонность растения поглощать и накапливать определенные элементы. Во время роста растения в основном поглощают и используют элементы из почвы в их биодоступных формах. Таким образом, коэффициент переноса растений, рассчитанный с использованием биодоступных фракций элементов в почве, отражает способность или тенденцию растения более эффективно поглощать и накапливать определенные элементы. Значение X_{BAC} для микроэлементов растений было рассчитано с использованием данных фракционирования почвы, собранных и протестированных в том же месте, результаты представлены в таблице 1.

Табл. 1.

Значения X_{BAC} микроэлементов в различных растениях в районе Шичжюань.

Element	Plants (N = 20)	X_{BAC}	σ	Element	Plants (N = 20)	X_{BAC}	σ
Ni	<i>A. argyi</i>	1.8~39.7 (11.9) *	15.8	Sb	<i>A. argyi</i>	0.4~138.1 (18.1)	45.9
	<i>M. japonica</i>	1.1~38.3 (9.1)	7.3		<i>M. japonica</i>	1.0~104.9 (16.3)	20.9
	<i>D. dichotoma</i>	0.35~47.8 (12.0)	2.9		<i>D. dichotoma</i>	0.5~262.2 (23.3)	87.2
Cu	<i>A. argyi</i>	6.6~189.8 (53.6)	61.1	Pb	<i>A. argyi</i>	0.1~13.4 (2.7)	3.4
	<i>M. japonica</i>	2.9~83.5 (19.1)	16.1		<i>M. japonica</i>	0.1~13.8 (2.3)	2.7
	<i>D. dichotoma</i>	4.8~111.1 (23.1)	26.6		<i>D. dichotoma</i>	0.1~13.3 (2.9)	3.1
Zn	<i>A. argyi</i>	9.3~146.4 (45.9)	45.7	Bi	<i>A. argyi</i>	0.7~602.2 (75.8)	200.5
	<i>M. japonica</i>	4.0~44.1 (15.1)	8.0		<i>M. japonica</i>	1.2~172 (42.4)	34.2
	<i>D. dichotoma</i>	6.3~65.2 (27.3)	14.7		<i>D. dichotoma</i>	0.5~692 (83.7)	230.5
Mo	<i>A. argyi</i>	1.7~144.8 (41.0)	80.1	Th	<i>A. argyi</i>	0.03~1.13 (0.3)	3.3
	<i>M. japonica</i>	0.84~52.3 (13.2)	10.3		<i>M. japonica</i>	0.007~0.162 (0.06)	0.03
	<i>D. dichotoma</i>	2.7~54.69 (18.7)	16.8		<i>D. dichotoma</i>	0.02~0.21 (0.06)	0.05
Cd	<i>A. argyi</i>	2.5~242.8 (65.9)	76.7	U	<i>A. argyi</i>	0.07~0.6 (0.24)	0.16
	<i>M. japonica</i>	0.744~12.37 (6.6)	2.3		<i>M. japonica</i>	0.029~0.24 (0.1)	0.03
	<i>D. dichotoma</i>	1.3~141.8 (26.2)	35.1		<i>D. dichotoma</i>	0.04~0.28 (0.15)	0.06
Sn	<i>A. argyi</i>	6.9~237.0 (50.0)	36.0				
	<i>M. japonica</i>	10.6~118.5 (33.7)	21.6				
	<i>D. dichotoma</i>	5.6~284.4 (54.2)	92.9				

* The values in parentheses are the average.

В районе исследования три растения продемонстрировали высокую способность поглощать и накапливать биодоступные фракции металлических элементов (Ni, Cu, Zn, Mo, Cd, Sn, Sb, Pb, Bi) в почве, при этом их средние значения $X_{\text{ВАС}}$ превышали 5. И наоборот, эти растения показали минимальное поглощение радиоактивных элементов (U, Th) из почвы, при средних значениях $X_{\text{ВАС}}$ ниже 1. Среди трех видов *A. Argyi* значительно поглощал и накапливал микроэлементы, такие как Cu, Zn, Mo и Cd, со средними значениями $X_{\text{ВАС}}$ 53,6, 45,9, 41,0 и 66,0 соответственно. *D. Dichotoma* продемонстрировала наибольшую способность поглощать и накапливать Ni, Sn, Sb, Pb и Bi, со средними значениями $X_{\text{ВАС}}$ 12,0, 54,2, 23,3, 2,9 и 83,9 соответственно (табл. 1). Напротив, *M. Japonica* обладал относительно более слабыми способностями к поглощению и накоплению этих микроэлементов. В целом, возможности по обогащению *A. Argyi* и *D. Dichotoma* по большинству микроэлементов превосходили таковые у *M. japonica*.

Индикаторные характеристики микроэлементов различных растений.

В этом исследовании оценивались индикаторные характеристики трёх растений по содержанию в них микроэлементов путём анализа концентрации микроэлементов в листьях и коэффициента контрастности отклонений (K_{CD}) в одном и том же месте отбора проб. Как правило, средняя концентрация (ω_o) служит приблизительным показателем степени обогащения растений микроэлементами, в то время как значения K_{CD} для микроэлементов в растениях показывают величину геохимических аномалий. Кроме того, изменение концентрации микроэлементов в растениях даёт представление о надёжности их способности сигнализировать об аномалиях окружающей среды, связанных с микроэлементами.

Среди трех растений у *A. Argyi* были самые высокие концентрации В, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mo, Ni, Sn, Th, U, Tl и Zn, при значениях ω_o 43.50, 1.91, 4.45, 0.601, 0.94, 22.0, 495.9, 1.673, 3.87, 0.327, 0.143, 0.084, 0.076, и 84,80 соответственно. *M. Japonica* продемонстрировала самые высокие концентрации Hg, Sb и Se со значениями ω_o 0,180, 0,695 и 0,966 соответственно. *D. Dichotoma* имела самые высокие концентрации Ag, As, Mn и Pb со значениями ω_o 0,137, 86,12, 995,7 и 15,4 соответственно (табл. 2). *A. Argyi* продемонстрировал наиболее выраженные геохимические аномалии для В, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Th, Tl и U, с соответствующими значениями K_{CD} для 4.350, 2.182, 9.431, 4.522, 3.364, 3.590, 4.634, 7.503, 2.879, и 2.090. *M. Japonica* продемонстрировала наиболее выраженные геохимические аномалии для Hg, с K_{CD} равным 3.918. Аналогичным образом, *D. Dichotoma* демонстрировала заметные геохимические аномалии по Ag, As, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn и Zn со значениями K_{CD} 3,497, 51,260, 1,682, 3,702, 2,430, 2,763, 2,028, 2,104, 2,660 и 2,861 соответственно.

Концентрации микроэлементов (ω_o) и коэффициенты контрастности отклонений (K_{CD}) для разных растений в одинаковых точках отбора проб.

Element	Plants (N = 20)	ω_o (ug g ⁻¹)	σ	K_{CD}	Element	Plants (N = 20)	ω_o (ug g ⁻¹)	σ	K_{CD}
Ag	<i>A. argyi</i>	0.029-0.093 (0.059) *	0.016	1.33	Mo	<i>A. argyi</i>	0.62-3.36 (1.67)	0.69	3.41
	<i>M. japonica</i>	0.011-0.088 (0.048)	0.019	1.07		<i>M. japonica</i>	0.34-0.76 (0.513)	0.11	1.05
	<i>D. dichotoma</i>	0.028-1.33 (0.137)	0.65	3.50		<i>D. dichotoma</i>	0.28-2.47 (0.963)	1.10	3.70
As	<i>A. argyi</i>	2.12-9.44 (4.22)	1.83	2.20	Ni	<i>A. argyi</i>	0.82-7.73 (3.87)	2.30	2.39
	<i>M. japonica</i>	0.609-4.34 (2.357)	0.93	1.23		<i>M. japonica</i>	1.56-5.03 (2.47)	0.87	1.36
	<i>D. dichotoma</i>	0.636-1525 (86.1)	762.18	51.3		<i>D. dichotoma</i>	0.36-9.71 (3.79)	3.12	2.43
B	<i>A. argyi</i>	20-70 (43.5)	25.0	4.35	Pb	<i>A. argyi</i>	4.92-20.7 (9.91)	3.95	1.77
	<i>M. japonica</i>	10-29.9 (15.5)	4.98	1.55		<i>M. japonica</i>	3.62-13.1 (7.60)	2.37	1.36
	<i>D. dichotoma</i>	10-29.9 (12)	4.98	1.33		<i>D. dichotoma</i>	1.94-70.8 (15.4)	6.18	2.76
Bi	<i>A. argyi</i>	0.83-3.98 (1.91)	1.05	2.18	Sb	<i>A. argyi</i>	0.328-1.19 (0.06)	0.26	1.47
	<i>M. japonica</i>	0.59-2.55 (1.55)	0.49	1.77		<i>M. japonica</i>	0.278-1.315 (0.695)	0.39	1.71
	<i>D. dichotoma</i>	0.16-5.54 (1.11)	2.69	2.03		<i>D. dichotoma</i>	0.107-1.67 (0.46)	0.72	2.03
Cd	<i>A. argyi</i>	0.32-12.6 (4.45)	6.14	9.43	Se	<i>A. argyi</i>	0.39-1.31 (0.758)	0.26	1.76
	<i>M. japonica</i>	0.24-0.78 (0.509)	0.14	1.08		<i>M. japonica</i>	0.36-1.4 (0.966)	0.14	1.86
	<i>D. dichotoma</i>	0.14-7.46 (2.06)	0.23	4.36		<i>D. dichotoma</i>	0.16-1.74 (0.547)	0.29	2.10
Co	<i>A. argyi</i>	0.07-1.64 (0.601)	0.12	4.52	Sn	<i>A. argyi</i>	0.18-0.65 (0.327)	0.12	1.63
	<i>M. japonica</i>	0.05-0.15 (0.107)	0.03	0.81		<i>M. japonica</i>	0.06-0.5 (0.273)	0.05	1.37
	<i>D. dichotoma</i>	0.049-2.03 (0.504)	0.5	3.80		<i>D. dichotoma</i>	0.13-0.78 (0.282)	0.33	2.66
Cr	<i>A. argyi</i>	0.28-2.3 (0.942)	0.41	3.36	Th	<i>A. argyi</i>	0.015-0.668 (0.143)	0.22	7.50
	<i>M. japonica</i>	0.16-0.95 (0.354)	0.20	1.27		<i>M. japonica</i>	0.006-0.066 (0.03)	0.02	1.57
	<i>D. dichotoma</i>	0.07-1.6 (0.48)	0.38	1.71		<i>D. dichotoma</i>	0.013-0.058 (0.026)	0.01	1.38
Cu	<i>A. argyi</i>	10.8-33.7 (22.0)	7.63	3.60	Tl	<i>A. argyi</i>	0.031-0.224 (0.084)	0.05	2.88
	<i>M. japonica</i>	4.76-8.26 (6.74)	0.88	1.02		<i>M. japonica</i>	0.028-0.09 (0.053)	0.02	1.56
	<i>D. dichotoma</i>	4.95-17.3 (8.73)	3.09	1.32		<i>D. dichotoma</i>	0.012-0.493 (0.063)	0.16	1.96
Fe	<i>A. argyi</i>	99-1402 (495.9)	434.33	4.63	U	<i>A. argyi</i>	0.023-0.148 (0.076)	0.03	2.09
	<i>M. japonica</i>	38-275 (139)	59.25	1.30		<i>M. japonica</i>	0.005-0.051 (0.032)	0.01	0.94
	<i>D. dichotoma</i>	74-222 (124.5)	42.33	1.16		<i>D. dichotoma</i>	0.029-0.089 (0.049)	0.02	1.35
Hg	<i>A. argyi</i>	0.037-0.08 (0.055)	0.08	1.19	Zn	<i>A. argyi</i>	24-202 (84.8)	44.5	2.70
	<i>M. japonica</i>	0.008-0.403 (0.18)	0.08	3.92		<i>M. japonica</i>	18.5-48 (24.6)	7.38	0.99
	<i>D. dichotoma</i>	0.018-0.098 (0.05)	0.02	1.11		<i>D. dichotoma</i>	22.2-91.3 (46.15)	23.03	2.86
Mn	<i>A. argyi</i>	153.5-1980 (696.0)	608.83	1.18					
	<i>M. japonica</i>	152-1120 (856.4)	252.5	1.45					
	<i>D. dichotoma</i>	57.3-1860 (995.7)	469.2	1.68					

* The values in parentheses are the average.

Геохимические аномалии в районе Шизуюань выявили элементы-минерализаторы, такие как вольфрам, олово, молибден, висмут, медь, свинец, цинк, кадмий, мышьяк, сурьма, серебро и золото. Хотя *A. Argyi* заметно обогащена 14 микроэлементами, такими как В, Вi и Cd, и демонстрирует значительные геохимические аномалии по 10 из этих элементов, *D. Dichotoma* охватывает самый широкий диапазон концентраций Ag, As, Bi, Mo, Ni, Pb, Sb, Se и Sn. Она также демонстрирует геохимические аномалии по Ag, As, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn и Zn, что указывает на потенциальное наличие аномалий минерализации в исследуемой области. Однако *M. Japonica* эффективно указывает только на аномалии ртути. Следовательно, *D. Dichotoma* является наиболее подходящим растением-индикатором фитогеохимической минерализации в исследуемой области.

Статистика геохимических параметров растений-индикаторов.

Основываясь на вышеупомянутом анализе и обсуждении, в этом исследовании основное внимание уделялось *D. Dichotoma* (листьям) для анализа геохимических свойств, содержащихся в них микроэлементов и оценки их значимости для поисков. Аналитические результаты включали интенсивность аномалии, стандартное отклонение, коэффициент обогащения (K_{NJ}), коэффициент контрастности (K_{CD}) и коэффициент изменчивости (C_V) для каждого микроэлемента. K_{NJ} , использующий среднюю концентрацию элементов в растениях в качестве регионального фона, приблизительно отражает фон элементной минерализации; K_{CD} ,

основанный на средней концентрации элементов в растениях в контрольной зоне в качестве регионального фона, указывает на степень фитогеохимических аномалий. Кроме того, C_V служит важным параметром для оценки степени элементной дифференциации. В одинаковых условиях (при одинаковом K_{NJ}) элементы с высоким C_V демонстрируют значительную дифференциацию и легко обогащаются локально для минерализации.

Результаты анализа приведены в таблице 3. В образцах *D. Dichotoma* такие элементы, как Ag, As, Bi, Co, Hg, Mn, Mo, Pb, Sb, Se, Sn, Th и U, демонстрировали сильную минерализацию, при этом значения K_{NJ} составляли 14.30, 1466.0, 1053.0, 2.317, 2.745, 4.236, 2.260, 14.71, 4.537, 27.49, 1.139, 5.127, и 5.054, соответственно. Геохимические аномалии для таких элементов, как Ag, As, Bi, Cd, Co, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn и Zn, были выраженными, со значениями K_{CD} , равными 7.526, 89.390, 1.932, 3.657, 3.534, 4.431, 2.726, 2.679, 2.000, 2.125, 2.621, и 2.029, соответственно. Такие элементы, как Ag, As, Bi, Cd, Co, Fe, Mo, Ni, Sb и Tl, продемонстрировали значительную геохимическую дифференциацию, со значениями C_V 1.618, 2.847, 1.022, 1.038, 1.014, 1.006, 1.027, 1.190, 1.252, и 1.411 соответственно. Образцы *D. dichotoma*, содержащие Ag, Bi, Mo, Pb, Sb, Se и Sn, не только демонстрируют благоприятный металлогенический фон, отчетливые геохимические аномалии и выраженные дифференцирующие характеристики, но также обладают высоким потенциалом локального обогащения минерализацией, что соответствует металлогеническим условиям исследуемого района.

Табл. 3.

Геохимические параметры ключевых растений в районе Шичжюань.

Element (N = 42)	ω_o (ug/g)	ω_{max} (ug/g)	ω_{min} (ug/g)	σ	K_{NJ}	K_{CD}	C_V	ω_b (ug/g)
Ag	0.286	1.585	0.028	0.463	14.30	7.526	1.618	0.038
As	146.6	1970	0.636	417.370	1466	89.390	2.847	1.640
B	14.88	40.00	10.00	9.404	0.372	1.667	0.632	8.926
Bi	1.053	5.540	0.065	1.076	1053	1.932	1.022	0.545
Cd	1.693	7.460	0.134	1.757	33.86	3.657	1.038	0.463
Co	0.463	2.030	0.043	0.469	2.317	3.534	1.014	0.131
Cr	0.494	1.600	0.060	0.371	0.329	1.777	0.752	0.278
Cu	9.786	22.70	4.150	5.891	0.979	1.493	0.602	6.555
Fe	129.6	254.0	74.00	130.378	0.864	1.217	1.006	106.5
Hg	0.055	0.130	0.018	0.026	2.745	1.196	0.481	0.046
Mn	847.3	2070	55.60	597.347	4.236	1.438	0.705	589.2
Mo	1.130	2.940	0.170	1.161	2.260	4.431	1.427	0.255
Ni	4.171	12.40	0.350	4.963	0.278	2.726	1.19	1.530
Pb	14.71	70.80	1.940	8.105	14.71	2.679	0.551	5.491
Sb	0.454	1.670	0.056	0.568	4.537	2.000	1.252	0.227
Se	0.550	1.740	0.160	0.279	27.49	2.124	0.507	0.259
Sn	0.228	0.780	0.030	0.144	1.139	2.621	0.631	0.087
Th	0.026	0.058	0.008	0.011	5.127	1.368	0.416	0.019
Tl	0.052	0.493	0.010	0.073	0.010	1.625	1.411	0.032
U	0.051	0.115	0.027	0.021	5.054	1.342	0.407	0.038
Zn	49.98	97.10	22.20	19.292	1.250	2.029	0.386	24.63

3.2. Многомерный статистический анализ.

Из-за перекрывающихся или частично перекрывающихся эффектов множества геологических процессов в одном регионе региональные геохимические данные обычно

характеризуются многоэлементными или многовариантными характеристиками. Чтобы дифференцировать воздействие различных геологических процессов, обычно используют кластерный анализ R-типа и факторный анализ элементов R-типа для выяснения их взаимосвязей, закономерностей совместного залегания и характеристик региональной минерализации. На сегодняшний день исследований по применению факторного анализа R-типа и кластерного анализа R-типа к фитогеохимическим данным явно недостаточно.

Кластерный анализ R-типа.

Кластерный анализ R-типа был проведён на основе геохимических данных по 21 микроэлементу из образцов *D. Dichotoma* (N=42), нормализованных по z-шкале, с использованием SPSS 20.0. Были получены спектрограммы, которые позволили выявить взаимосвязи между элементами. Как показано на рисунке 3, с коэффициентом расстояния 10 21 микроэлемент был разделён на пять отдельных групп.

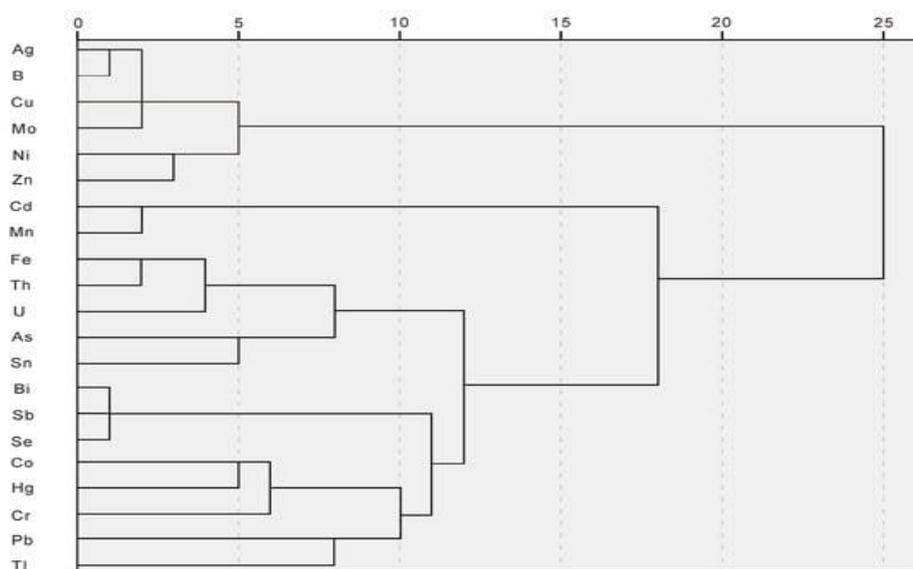


Рис. 3. Спектр кластерного анализа микроэлементов ключевого растения в районе Шичжюуань.

Первая группа, включающая переходные элементы Ag, Cu, B, Mo, Ni и Zn, отражает различные гидротермальные наложения, при этом Ag, Cu и Mo демонстрируют более тесные пространственные связи. Вторая группа включает переходные элементы Cd и Mn, которые представляют собой комбинацию окислительных элементов. Третья группа, содержащая металлические элементы Fe, Th, U, As и Sn, указывает на влияние средне- и высокотемпературных гидротермальных флюидов, при этом Sn демонстрирует большую пространственную независимость. Четвертая группа, включающая цветные металлы Bi, Sb и Se, демонстрирует сильное сродство к сере, легко образует ковалентные связи с ионами серы и демонстрирует тесные пространственные взаимосвязи. Пятая группа, состоящая из переходных элементов Co, Hg, Cr, Pb и Tl, отражает различные гидротермальные эффекты, при этом эти

элементы демонстрируют относительную пространственную независимость. Кроме того, потенциальные рудообразующие элементы Sn, Mo, Bi, Zn, Cu и Pb распределены по различным элементным группам, демонстрируя сильную независимость. Это предполагает пространственное зонирование рудообразующих элементов на исследуемой территории.

Факторный анализ.

В этом исследовании использовался факторный анализ для изучения пространственных закономерностей распределения потенциальных минерализующих элементов на большей глубине. Согласно тесту Бартлетта на сферичность и критерию Кайзера–Мейера–Олкина (КМО), значение значимости (Sig), полученное в результате теста Бартлетта, составило 0,00, а индекс КМО достиг 0,788, что превышает рекомендованный Kaiser порог в 0,6. Эти результаты выявляют значительную взаимосвязь внутри набора данных, что делает его подходящим для факторного анализа. Были применены анализ основных компонентов и вращение varimax на основе собственных значений >1 и коэффициента вклада кумулятивной дисперсии $> 81,366\%$. Коэффициенты были получены на основе факторных нагрузок, которые превышали абсолютное значение 0,6, что привело к четырем различным наборам факторов, как подробно описано в таблице 4.

Табл. 4.

Матрица нагрузки с коэффициентом ортогонального вращения микроэлементов доминирующего растения в районе Шичжюань.

Element	F1	F2	F3	F4
Ag	0.194	0.035	0.698	0.557
As	0.818	0.240	0.107	0.318
B	0.447	0.318	-0.061	0.640
Bi	0.674	0.139	0.450	0.465
Cd	0.550	0.731	-0.184	-0.011
Co	0.622	0.650	0.033	-0.094
Cr	0.773	0.335	0.102	-0.088
Cu	0.335	0.831	-0.022	0.156
Fe	0.894	0.378	0.086	0.072
Hg	0.259	0.371	0.559	0.443
Mn	0.199	0.546	0.512	-0.157
Mo	-0.071	-0.302	0.144	0.706
Ni	0.056	0.823	0.196	-0.078
Pb	0.696	0.545	0.218	0.162
Sb	0.654	0.158	0.476	0.507
Se	0.281	0.631	0.280	0.401
Sn	0.709	0.150	0.502	0.407
Th	0.892	0.361	0.105	0.026
Tl	0.105	-0.101	0.921	0.028
U	0.736	0.106	0.407	0.219
Zn	0.407	0.852	-0.105	0.000
% of Variance (rotated)	31.819	23.359	14.437	11.752
Cumulative % of variance (rotated)	31.819	55.177	69.614	81.366

F1 представляет собой As–Cr–Fe–Sn–Th–U с коэффициентом вариации 31,819%, характеризующийся комбинацией низко-, средне- и высокотемпературных элементов, отражающих наложение множества гидротермальных событий. F2 представляет Cd–Cu–Ni–Zn

с коэффициентом вариации 23,359%, идентифицированный как комбинация элементов с низкой и средней температурой, отражающая магма-гидротермальную активность, связанную с кислыми и умеренно кислыми интрузивными породами в регионе. F3 и F4 представляют T1 и Mo соответственно, с коэффициентами вариации 14,437% и 11,752% соответственно. Оба они являются независимо существующими высокотемпературными элементами, что дополнительно демонстрирует высокотемпературную гидротермальную минерализацию. Совпадение результатов кластерного анализа R-типа и факторного анализа подтверждает их согласованное происхождение.

4. Обсуждение.

4.1. Факторы, влияющие на содержание микроэлементов в растениях.

Части большинства растений можно разделить на корни, стебли, ветви, кору, листья и плоды, каждый из которых выполняет различные физиологические функции и демонстрирует значительные различия в элементном составе и концентрации. Биогеохимическое исследование на месторождении Твин Лейкс с использованием коры, сучьев и хвои *Picea mariana* показало, что такие элементы, как Au, As, Bi, Se, Sb, Tl, Fe, Co, Ni, Cr, Mo, Cd, Pb, Zn, Ca, Ba и Cu преимущественно накапливаются в сучьях и коре, в то время как B, K, Mg, Mn и P преимущественно содержатся в растениях. концентрируется в иглах. Эти различия отражают различную способность частей растений поглощать и концентрировать микроэлементы. В этом исследовании, как показано в таблице 3, концентрации Cu (4,2 ~ 22,7 мкг/г), Fe (74 ~ 254 мкг/г), Mn (56 ~ 2070 мкг/г), Mo (0,2 ~ 3 мкг/г) и Zn (22 ~ 97 мкг/г) в листьях *Dicranopteris dichotoma* были относительно высокими, вероятно, потому, что эти элементы являются необходимыми микроэлементами для роста растений. Например, железо и марганец играют важнейшую роль в процессах фотосинтеза у растений. Как правило, растения вырабатывают механизмы защиты от элементов, которые являются для них высокорadioактивными или токсичными. Однако *Dicranopteris dichotoma*, по-видимому, обладает высокой устойчивостью к вредным тяжёлым металлам, таким как мышьяк (1–1970 мкг/г), кадмий (0,2–7,5 мкг/г) и свинец (2–71 мкг/г), что может быть связано с его адаптивными физиологическими механизмами. Значения K_{NJ} и K_{CD} для таких элементов, как Ag, As, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Th, Tl, U и Zn, превысили 1, что указывает на то, что *D. Dichotoma* в районе Шичжюань реагирует на стресс, вызванный высокой концентрацией металлов в почве, горных породах или грунтовых водах, что приводит к обогащению полиметаллами. pH почвы является ключевым фактором, влияющим на биодоступность микроэлементов. В почвах с низким pH большое количество ионов водорода способствует высвобождению ионов микроэлементов с гидроксильных

поверхностей глинистых минералов, повышая их концентрацию и активность, что способствует их накоплению в растениях. Исследуемая территория в этом исследовании характеризуется кислыми почвами с диапазоном pH от 4,6 до 6,8, что может частично объяснить легкость, с которой растения накапливают микроэлементы.

4.2. Проверка результатов на основе известного оруденения и геологических данных.

Благодаря анализу микроэлементов в трех доминирующих видах растений листья *Dicranopteris dichotoma* были идентифицированы как ключевое растение-индикатор. Это исследование подтвердило достоверность результатов с помощью различных аналитических методов. Ag, As, Bi, Cd, Pb, Mo, Sn, Ti, U и Zn показали четкие закономерности обогащения и геохимические аномалии в образцах растений, со значениями K_{NJ} выше 5 и K_{CD} выше 2, а все значения C_v превышали 1. Характеристики геохимической аномалии W–Sn месторождения Шичжюань выявили минерализующие элементы, такие как W, Sn, Mo, Bi, Cu, Pb, Zn, Cd, As, Sb, Ag и Au. По сравнению с известными характеристиками распределения минерализующих элементов, *Dicranopteris dichotoma* демонстрирует значительные геохимические аномалии для таких элементов, как Ag, As, Bi, Mo, Ni, Pb, Sb, Se и Sn. В сочетании с результатами кластерного анализа R-типа и факторного анализа система минерализации в исследуемом районе демонстрирует сложные характеристики гидротермальной эволюции. Независимое распределение потенциальных минерализующих элементов, таких как Sn, Mo, Bi, Zn, Cu и Pb, в пределах соответствующих групп позволяет предположить, что они могли образоваться в результате различных гидротермальных процессов или стадий минерализации. Разнообразные сочетания средне-, высоко- и низкотемпературных гидротермальных процессов в исследуемом районе ещё больше подчёркивают сложность минерализующей среды и потенциальных рудных объектов. Эти результаты в совокупности подтверждают эффективность *Dicranopteris dichotoma* в качестве индикаторного растения для поисков.

4.3. Ограничения и перспективы на будущее.

Хотя это исследование демонстрирует потенциал фитогеохимических методов для исследования глубоко скрытых рудных тел, остаются некоторые ограничения. Несмотря на обширные усилия по биогеохимическим исследованиям во всем мире, процессы, посредством которых минерализующие элементы диффундируют из скрытых рудных объектов, мигрируют на поверхность и поглощаются, транспортируются и накапливаются растениями в их различных частях, все еще очень сложны и недостаточно изучены. Будущие исследования должны быть в большей степени сосредоточены на механизмах обогащения растений различными микроэлементами для повышения точности и достоверности данных.

5. Выводы.

1. В этом исследовании изучались геохимические характеристики микроэлементов у доминирующих видов растений в рудном районе Шичжюань. Образцы растений демонстрировали благоприятный фон минерализации, геохимические аномалии и закономерности дифференциации, тем самым доказывая целесообразность использования фитогеохимических методов для поисков полезных ископаемых.

2. При анализе средней концентрации сухого веса (ω_o) и коэффициента контрастности (K_{CD}) в стеблях и листьях трех местных доминирующих видов растений — *Artemisia argyi*, *Maesa japonica* и *Dicranopteris dichotoma* — было обнаружено, что листья не только обладают большей способностью к обогащению микроэлементами, но и демонстрируют более четкие геохимические характеристики. Таким образом, листья определены как оптимальные части растений отбора проб для изучения фитогеохимических характеристик.

3. Коэффициент поглощения (X_{BAC}) биодоступных металлических элементов в почве и коэффициент контрастности (K_{CD}) относительно фоновой территории показали, что *D. Dichotoma* демонстрирует более выраженные геохимические аномалии для потенциальных минерализующих элементов (Ag, As, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn) в пределах исследуемой территории. Это указывает на то, что *D. Dichotoma* особенно хорошо подходит в качестве растения-индикатора для поисков в этом регионе.

4. С помощью кластерного и факторного анализа геохимических данных растений потенциальные минерализующие элементы были разделены на четыре группы: (1) Sn–As, (2) Ag–Cu–Mo, (3) Pb и (4) Bi–Sb–Se. Это указывает на четкое пространственное распределение минерализующих элементов на территории исследования, что даёт ценные рекомендации для будущих поисков полезных ископаемых.

5. Полученные результаты открывают новые эффективные возможности для выявления скрытого оруденения в схожих геологических условиях и создают важную основу для будущих исследований и прогнозирования минеральных ресурсов.

6. Хотя это исследование подтверждает эффективность фитогеохимических методов для обнаружения скрытого оруденения, необходимы дальнейшие исследования для уточнения механизмов обогащения растений и оценки применимости метода в различных геологических условиях

VI. ИНТЕГРАЦИЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ И МАГНИТНЫХ ДАННЫХ ПРИ ПРОГНОЗНО-МИНЕРАГЕНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ.

(район Дуньян, Фуцзянь, Китай) [9].

1. Введение

При благоприятных геологических условиях магнитно-гравитационная разведка является одной из наиболее эффективных комбинаций геофизических методов для поисков полезных ископаемых.

Провинция Фуцзянь, расположенная на юго-востоке Китая, была сформирована многочисленными орогенными движениями, при этом движение Яньшань оказало значительное влияние на региональную тектонику, эволюцию плит и процессы минерализации. В сложной геологической обстановке находится район Дуньян, расположенный в центре восточной Фуцзяни. Район, с широким распространением вулканических пород, характеризуется наличием месторождений золота, особенно в знаменитом “Золотом треугольнике” провинции Фуцзянь. Район Дуньян является частью циркум-Тихоокеанского металлогенического пояса, наследия среднесрочной вулканической активности Яньшань и субдукции океанических плит под евразийский кратон. Минерализация золоторудного района Дуньян тесно связана с вулканическими комплексами поздней юры–раннего мела. Пространственно ограниченные по краям крупных вулканических структур, рудные тела преимущественно располагаются вдоль крупных разломов, второстепенных интрузивных тел, в совокупности демонстрируя преобладающее поясообразное распределение, ориентированное на северо-запад.

В настоящее время здесь открыто более 20 золоторудных и др. месторождений, включая месторождения Дэхуа Шуангцишань, Цюцунь и Юси Сяобань, что определяет поисковый потенциал пока невыявленного оруденения, в глубоких «скрытых» недрах района.

Территория характеризуется относительно низким уровнем геофизических исследований и ограниченным пониманием глубинных геологических структур. В рамках этого исследования проводилась магниторазведка с использованием ранее выявленных региональных гравитационных аномалий для исследования глубинных структур. Полученные данные обеспечивают основу для поисков скрытого оруденения в этом районе.

2. Геологические условия.

На протяжении геологической эволюции, начиная с раннего протерозоя, регион претерпевал последовательные эпизоды тектонических, магматических преобразований и минерализации, способствуя возникновению сложных взаимосвязей между тектоническими

условиями и динамикой минерализации на различных геологических этапах. Эти условия сыграли важную роль в формировании золотого и др. оруденения в районе Дуньян (рис. 1).

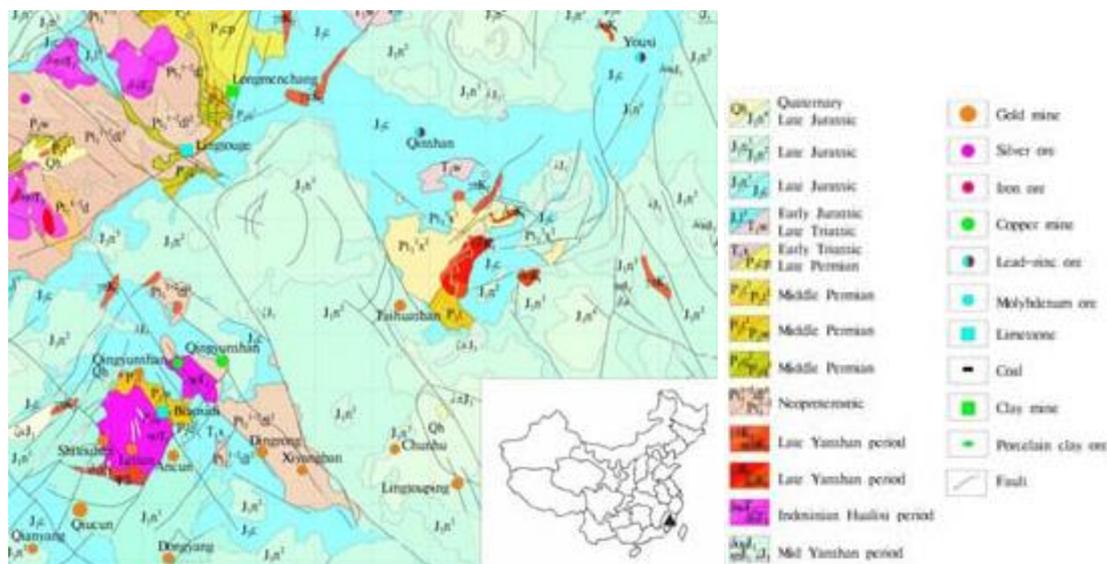


Рис. 1. Геологическая карта района Дуньян.

В районе представлены пять стратиграфических формаций, включая раннепротерозойскую формацию; синскую формацию; формацию позднего триаса–средней юры; континентальные отложения поздней юры–мелового периода; и рыхлые накопления четвертичного периода. Месторождения преимущественно контролируются разломными структурами СЗ простирания и гигантской кольцевой ВТС Да Юньшань. Оруденение локализуется в раннепротерозойской формации Далиншань, позднеюрской формации Наньюань и позднеюрской формации Чанлин.

Структура

Район Дуньян был центром интенсивной тектоническо-магматической активности в различные геологические периоды, включая поздний Яньшань и Сишань. Примечательно, что ранняя и поздняя деятельность Яньшаня характеризовалась обширными многоступенчатыми вулканическими явлениями. Интрузивные породы проявляются преимущественно в виде плутонов и штоков, изредка - даек. Преобладающий тип пород - гранодиорит и диоритовый порфирит.

Тектоно–магматические явления Яньшаньского орогенеза породили складчатость, надвиговые структуры, реконфигурацию ранее существовавших стратиграфических и структурных поверхностей и модификацию более ранних минерализованных тел. Кульминацией рудогенеза стал спектр рудных месторождений, включающий золото, серебро, медь, свинец, цинк, марганец, железо и др.

3. Методология.

В связи с тем, что глубинное оруденение в районе Дуньян в основном контролируется разломными структурами, в данном исследовании был проведен комплексный анализ региональных гравитационных данных масштаба 1:200 000. Кроме того, была проведена высокоточная наземная магнитная съемка в масштабе 1: 50 000 для выявления рудоконтролирующих разломных и др. структур, обычно расположенных в переходной зоне интенсивных положительных и отрицательных магнитных аномалий.

3.1. Региональная гравитация.

Гравитационные данные были обработаны с использованием метода интерполяции. Карта гравитационных аномалий Буге (рис. 2) описывает структурные характеристики гигантской кольцеобразной вулканической структуры Дэхуа-Юнтай.

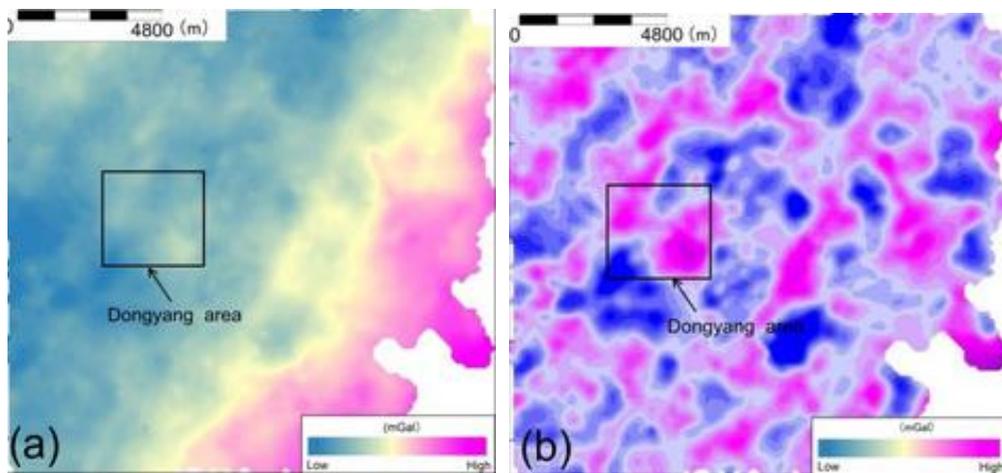


Рис. 2. (a) карта гравитации Буге и (b) карта остаточных гравитационных аномалий.

Внешнее кольцо демонстрирует несколько едва заметных аномалий высокой гравитации, в то время как внутреннее кольцо отличается заметной крупномасштабной аномалией низкой гравитации, окруженной внешним кольцом. Граница между внутренним и внешним кольцами на карте гравитационных аномалий Буге имеет определенную степень нечеткости, что, возможно, объясняется незначительными изменениями физических свойств соответствующих геологических формаций.

На основе карты гравитационных аномалий Буге и карты остаточных гравитационных аномалий было обнаружено, что основная часть района Дуньян расположена в юго-западном внутреннем кольце гигантской кольцевой структуры (рис. 3).

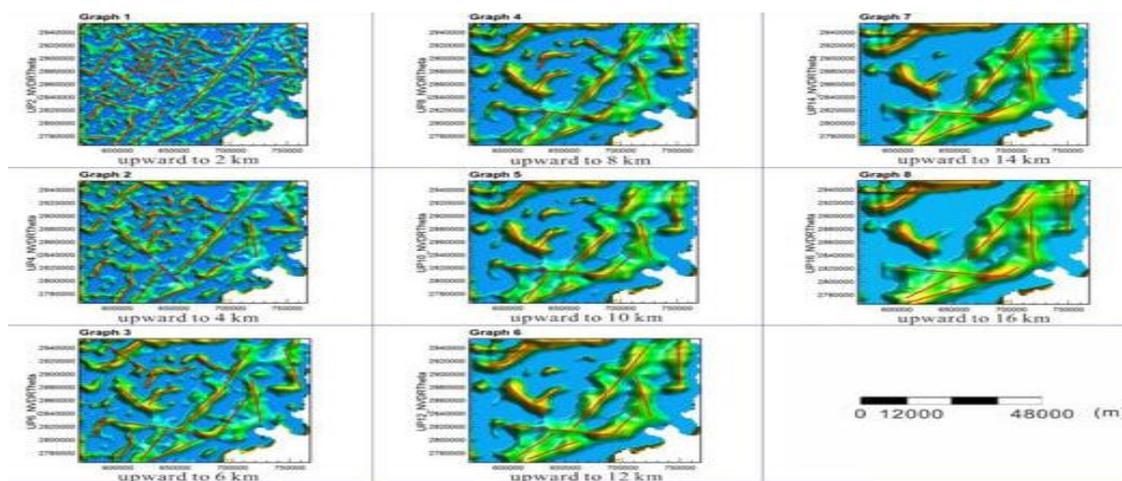


Рис. 3. Схемы многомасштабной идентификации границ и вывод линейных структур из карт вертикальной производной Тета вверх на разные высоты, красные линии - предполагаемые разломы.

Для исследования региональных структур были проведены исследования гравитационных аномалий на различных глубинах. Были рассчитаны вертикальные производные тета-карт для обнаружения границ аномалий в нескольких масштабах. Используя информацию о границах были изучены структуры глубинных разломов

3.2. Региональное магнитное поле.

В этом исследовании общая магнитная напряженность (ТМН) после международного геомагнитного эталонного поля (IGRF) была нанесена на сетку с использованием метода интерполяции Кригинга с размером сетки 250×100 м. Приведение к полюсу (RTP) было преобразовано с использованием частотной области с наклоном $39,24^\circ$ и $-4,18^\circ$ соответственно. Кроме того, производные первого порядка данных RTP были улучшены в четырех горизонтальных направлениях ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$).

Карты магнитных аномалий (рис. 4) отчетливо выявили наличие кольцевой ВТС и системы региональных разломов.

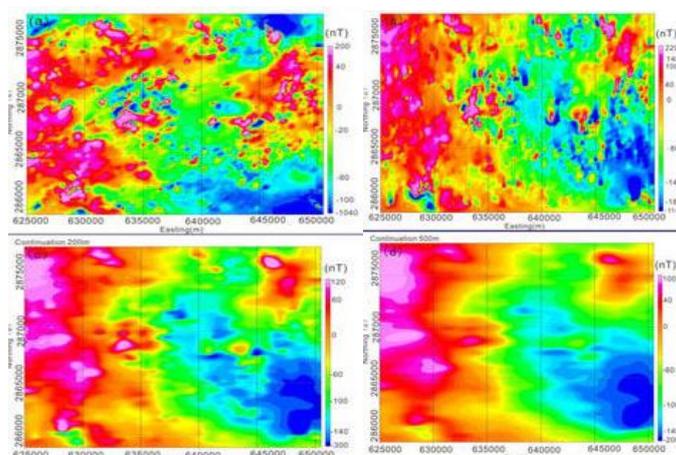


Рис. 4. Карты магнитных аномалий в районе Дуньяя.
(a) общей магнитной напряженности (ТМН), (b) снижения к полюсу (RTP), (c) до 200 м и (d) до 500 м

Изучение производных горизонтальных направлений (рис. 5) выявило закономерности распределения различных разломов разной ориентации.

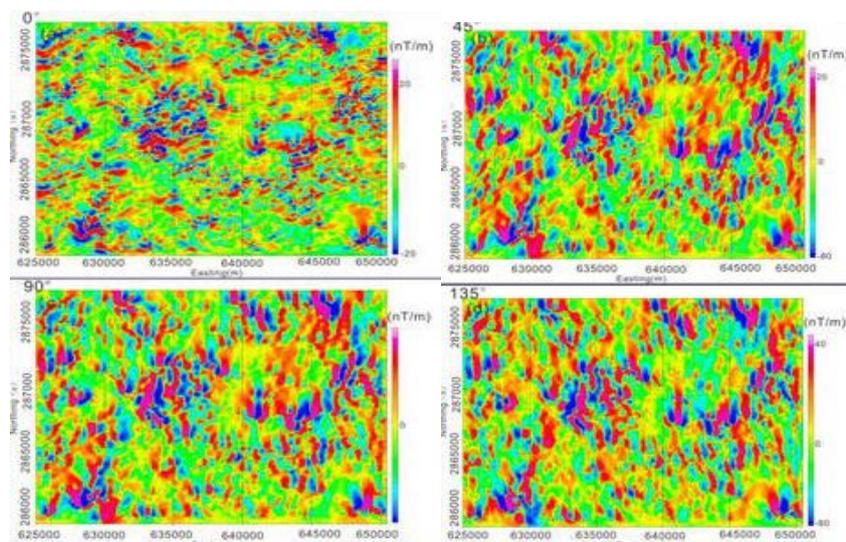


Рис. 5. Карты производных горизонтальных направлений (а) 0°, (б) 45°, (с) 90° и (д) 135°.

В этом исследовании была выполнена трехмерная (3D) инверсия магнитной восприимчивости по данным магнитной съемки с использованием программного обеспечения MAG3D 4.0, разработанного Колумбийским университетом. Инверсия была проведена с использованием исходных магнитных данных RTP 1:50 000. Программное обеспечение автоматически сгенерировало файл сетки, содержащий 84 сетки в направлениях EW (ось X) и NS (ось Y) с интервалом в 100 метров и 70 вертикальных сеток в направлении Z с увеличивающимися интервалами в сетке 50 м×4, 100 м×10, 200 м×15 и 400 м×5. Размер модели составлял 8400×8400×8000 м (X×Y×Z). Значения по умолчанию для начальной и эталонной моделей были равны нулю, с весовым коэффициентом 2 для функции взвешивания глубины.

Модель инверсии магнитной восприимчивости представлена на рисунке 6, а результаты инверсии проиллюстрированы на рисунке 7.

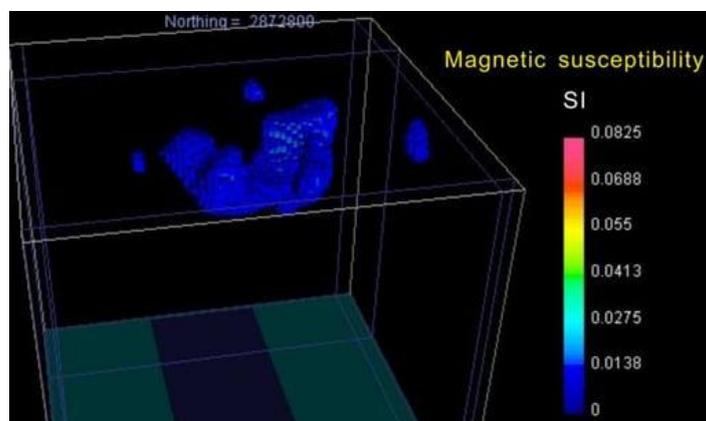


Рис. 6. Трехмерная модель инверсии магнитной восприимчивости. Магнитная восприимчивость синей изоповерхности равна 0,01.

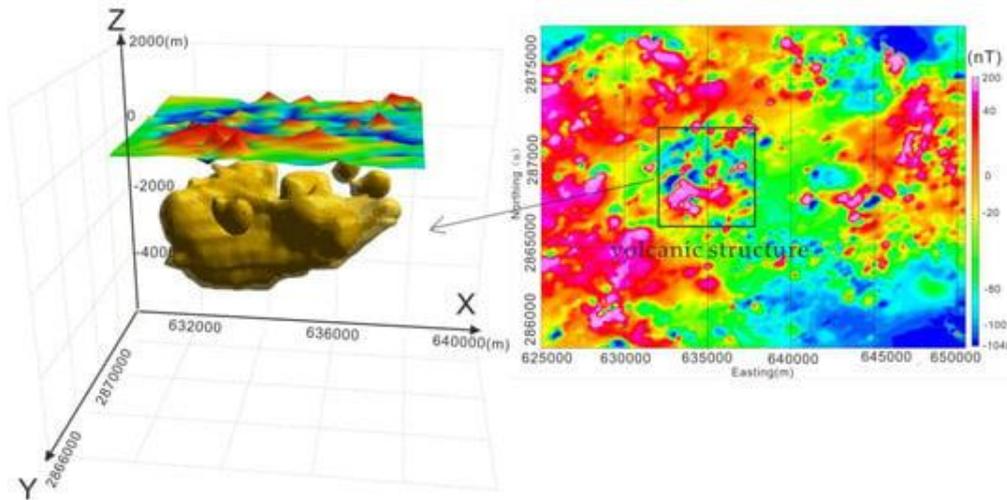


Рис. 7. Магнитные тела BTC в районе Дуньян методом трехмерной инверсии магнитной восприимчивости. Правый рисунок - карта TMI региона после IGRF, а прямоугольник - BTC.

Результаты инверсии демонстрируют хорошую корреляцию между распределением магнитных тел (основных вулканических пород), связанных с подземной вулканической структурой, и TMI после IGRF (рис.4а). Наличие магнитных тел в подземной вулканической структуре исследуемого района предполагает поисковый потенциал.

4. Результаты и обсуждение.

4.1. Анализ регионального гравитационного поля.

Из карт тета-вертикальной производной (рис. 8) очевидно, что в районе Дуньян есть два набора разломов северо-западного и северо-западного направлений.

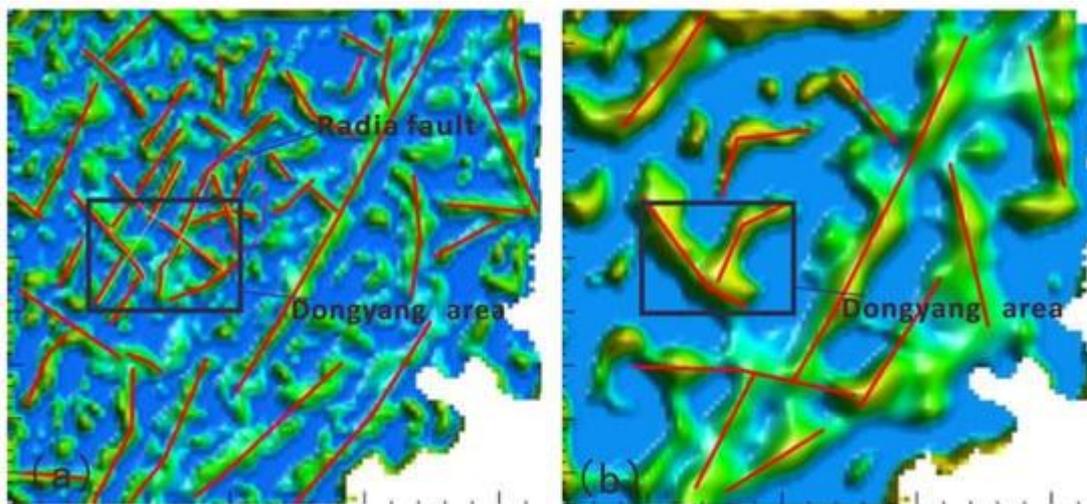


Рис. 8. Разломы на основе карт тета-вертикальной производной с продолжением вверх (а) 2,0 км и (б) 8,0 км., черная прямоугольная область - район Дуньян.

Кроме того, в северо-восточном углу района заметна система радиальных разломов. Как СВ, так и СЗ разломы проявлены на карте вертикальной производной тэта, демонстрируя

продолжение вверх на 2 км (рис. 8а). По мере увеличения высоты каждый из двух разломов северо-западного направления сходятся в единый разлом. Плоские проекции разломов северо-западного направления смещаются на юго-запад, в то время как разломы северо-восточного направления смещаются на юго-восток, очерчивая тенденции разломов. Одновременно система радиальных разломов постепенно уменьшается (рис. 8б), что указывает на ограниченное пространство для распространения радиальных разломов, характерную черту вулканических структур. Это наблюдение подразумевает потенциальное присутствие значительной скрытой вулканической структуры в районе Дуньян.

По мере увеличения высоты расширения линейные структуры, идентифицируемые тетравертикальной производной, постепенно уменьшаются, подчеркивая улучшенное представление информации о глубоких крупных разломах и исчезновение деталей мелких разломов. Многомасштабное определение границ гравитационного поля эффективно выявляет характеристики пространственного распространения первичных разломов в районе Дуньян и на его периферии.

4.2. Анализ регионального магнитного поля

На основе ТМІ после IGRF магнитной съемки в регионе (рис. 4а), региональное магнитное поле демонстрирует высокую степень сложности, характеризующуюся значительными колебаниями амплитуды. Преимущественно положительные аномалии наблюдаются в западном и северном секторах, в то время как локализованные положительные аномалии преобладают в восточном секторе. В центральной области заметен круговой рисунок хаотических положительных и отрицательных аномалий, отличающийся характерной веерообразной отрицательной аномалией, простирающейся с северо-востока через центральную область на юго-восток. Как при положительном, так и при отрицательном фоне магнитного поля аномалии различной силы, крутизны и ориентации накладываются друг на друга.

Уникальные характеристики регионального магнитного поля позволяют разделить регион Чжунсянь на три отдельные магнитные зоны: Лунмэнь-Дунхуа-Янмэй (Зона I), Шанчжуан-Хуашань-Чунху-Гайян (Зона II) и Цзихуа-Чилин (Зона III). Зона I дополнительно подразделяется на две подзоны, как показано на рисунке 9.

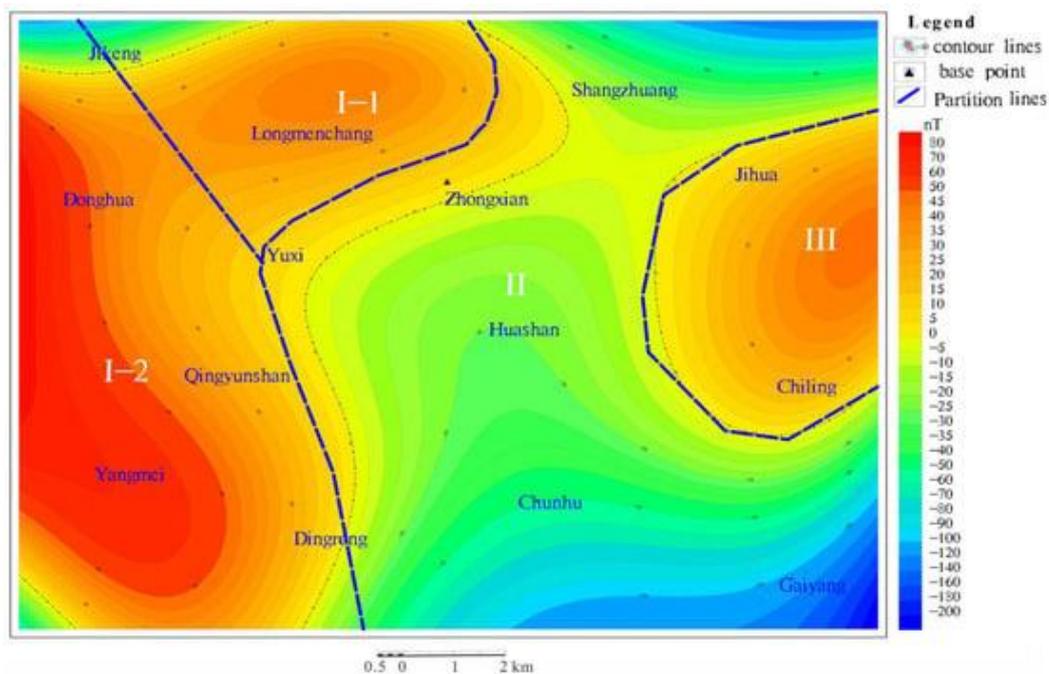


Рис. 9. Карта магнитного поля.

Зона I: Лунмэнь-Дунхуа-Янмэй.

Расположенная в западной и северной частях региона Зона I охватывает 18 км в длину и 12 км в ширину, с амплитудой магнитной аномалии в диапазоне от -100 до 90 нТл. Эта зона характеризуется наложением двух положительных аномалий и уменьшенной полосой аномалий северо-западного направления. Внешние границы очерчены различными магнитными зонами и полосами градиентов, при этом аномалии более выражены на западной стороне по сравнению с северной.

Район дополнительно разделен на подзоны I-1 и I-2 уменьшенной полосой аномалий, проходящей вдоль линии Цзикэн-Юси. Подзона I-1, имеющая эллиптическую форму, имеет тенденцию к северо-востоку, в то время как подзона I-2, представляющая собой полосу, расширяющуюся с запада на восток, имеет тенденцию к северо-западу с менее отчетливой уменьшенной полосой аномалий в середине. Геологический фон этой магнитной зоны сложный, включающий позднеюрские формации, вулканические породы раннеюрской формации, пермскую формацию и метаморфические породы, а также интрузивный кварцевый диорит и кварцевый монцонит раннего каледонского периода. На основе геологических данных предполагается, что основное поднятие в подзоне I-1 связано с раннекаледонским кварцевым диоритом, в то время как в подзоне I-2 - с раннекаледонским кварц-монцонитовым фундаментом. Полосы пониженных аномалий северо-западного и северо-восточного направлений, соединяющие внешние градиентные полосы магнитной зоны, интерпретируются как представляющие глубоко врезаемые структуры разломов магнитного фундамента.

Зона II: Шанчжуан-Хуашань-Чунху-Гайян

Расположенная в центральной части региона Зона II простирается от Шанчжуана на северо-востоке, через Хуашань в центральном регионе до Гайяна на юго-востоке. Магнитная зона имеет форму буквы “С”, простирающуюся на 18 км в длину и 10 км в ширину, с распространением на север и северо-запад. Два направления сходятся около Хуашаня, при этом магнитное поле переходит к расширению на север около Гайяна. Зона преимущественно демонстрирует отрицательные магнитные характеристики с постепенным изменением в центральной области и значительными изменениями градиента на северной и южной сторонах. Амплитуда изменяется с более высокими значениями в центральном регионе и более низкими значениями на обоих концах, снижаясь с 0 до -200 нТл.

В районе в основном представлены второй, третий и четвертый разрезы формации Наньюань и формации Чанлин, а в центральном регионе проступают метаморфические породы западной свиты Сисий. Установлены интрузии гранит-порфира, грано-диорита и кварцевого диорита. Основные характеристики магнитной зоны интерпретируются как покров вулканических пород и немагнитная или слабомагнитная формация Чанлин. Относительно высокая амплитуда аномалий в центральном секторе указывает на поднятие пород с кислой, промежуточной и нейтральной кислотностью, в то время как магнитные тренды на север и северо-запад приписываются различным структурам разломов.

Зона III: Цзихуа-Чилинг.

Расположенная в восточной части региона обладает более компактным магнитным диапазоном, размером 8,6 км в длину и 6,8 км в ширину. Эта зона имеет полуэллиптическую форму, аномалии имеют тенденцию к северо-востоку и преимущественно демонстрируют положительные магнитные характеристики с амплитудами в диапазоне от 0 до 50 нТл. Поверхностная геология в этой зоне в основном соответствует второму и третьему разрезам вулканических пород формации Наньюань с локализованными интрузиями позднеяньшаньского гранодиорита и обнажениями позднеюрского риолита. Вариации магнитного поля объясняются литологическими изменениями, условиями образования вулканических пород, а также тектонической и магматической активностью, что указывает на преобладание поднятого гранодиоритового фундамента при интерпретации магнитного поля.

4.3. Интерпретация разломов.

Структуры разломов в пределах магнитного поля обладают разнообразием характеристик, проявляющихся в основном в восьми различных типах: границы между различными зонами магнитного поля, зоны градиента магнитных аномалий, бусовидные зоны магнитных аномалий, линейные зоны аномалий, зоны резких изменений, зоны аномального смещения,

расположенные в шахматном порядке и радиальные группы зон аномалий. Благодаря анализу характеристик магнитного поля TMI после IGRF, RTP и продолжения вверх до 200 м и 500 м на рисунке 4, в сочетании с особенностями регионального гравитационного поля, в регионе было выявлено в общей сложности 39 структур разломов. Эти структуры преимущественно имеют тенденцию к северо-, северо-западному и северо-западно-западному направлениям. Некоторые из них также имеют ориентацию, близкую к ориентации север-юг, как показано на рисунке 10.

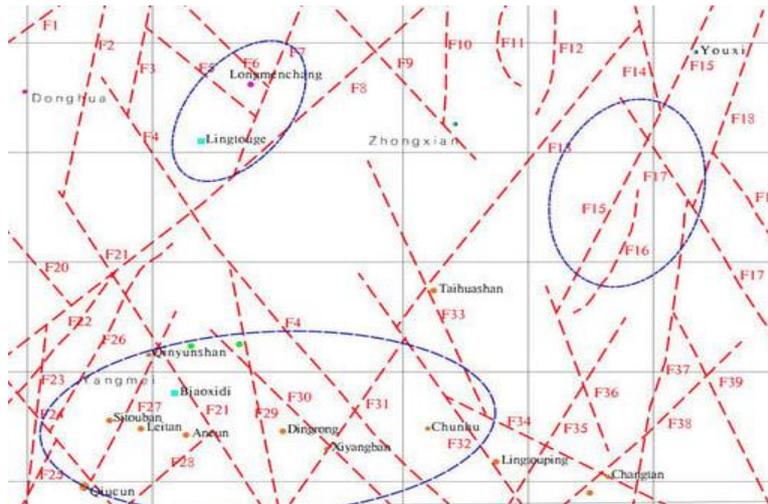


Рис. 10. Интерпретация структуры разломов региона. Красные пунктирные линии - предполагаемые разломы, а синими овалы обозначают металлогенически благоприятные районы.

В регионе магнитные исследования выявили в общей сложности 19 структур разломов, простирающихся на СЗ и СВ. Разломы северо-восточного направления часто пересекаются наклонно с региональным магнитным полем, что приводит к неоднородности структуры магнитного поля, которая часто проявляется в виде границ между различными зонами линейного градиента или бутообразными аномалиями. Крупные разломы северо-восточного направления, такие как F8 и F13, обладают региональными характеристиками, выступая в качестве границ в пределах зон магнитного поля. Эти разломы, особенно вблизи пересечений с разломами северо-западного направления, существенно влияют на распределение оруденения золота, свинца, цинка и др. Северо-западные разломы обычно функционируют как границы между различными зонами магнитного поля, зонами линейного градиента и зонами с низкой магнитной активностью, вызывая разрывы вдоль магнитного поля. Основные зоны разломов северо-западного направления, такие как F4 и F37, имеют региональное структурное значение, при этом F4 действует как граница в пределах зон магнитного поля, а F37 тесно совмещается с геологическими структурами, представляя собой глубоко врезанную структуру разлома магнитного фундамента. Эти зоны разломов северо-западного направления играют решающую роль в качестве каналов миграции рудообразующих элементов, влияя на распределение золота,

свинца, цинка и др. в регионе, имея региональное рудоконтрольное значение. Примечательно, что медно–золоторудные месторождения Сицянь и золоторудное месторождение Чунху, как полагают, контролируются северо-западными структурами разломов F29 и F32 соответственно.

Кроме того, магнитные исследования в этом районе выявили два разлома, простирающихся почти на север. Разломы с NS-трендом часто обладают такими характеристиками, как бусинообразные магнитные аномалии, и обычно расположены вблизи жерл вулканов, при этом F12 образует часть кольцевой вулканической структуры.

4.4. Перспективные поисковые площади.

На основе магнитных и гравитационных характеристик в сочетании с интерпретированными результатами и учетом известного оруденения в регионе Чжунсянь были определены три площади с потенциалом обнаружения полиметаллических месторождений.

(1) Лонгменчан.

В районе Лонгменчан представлено множество наборов структур разломов северо-западного направления. На поверхности вдоль этих структур выявлены широко распространенные проявления лимонита и окремнения. На пересечениях этих структур наблюдалась свинцово–цинковая минерализация в пределах карбонатных и глинистых отложений. При проведении поисков приоритетным направлением должно быть изучение соответствующих зон разломов и литологических контактных зон.

(2) Цюцунь-Чунху

В пределах этого района было выявлено 14 разломов, состоящих из семи структур северо-восточного и семи структур северо-западного направлений. На поверхности картируются окремнение, пиритизация и лимонитизация. На пересечении этих структур были обнаружены четыре золоторудные точки, шесть мелких рудопроявлений золота и одно месторождение среднего размера. Учитывая эти находки, условия поисков в этом районе считаются благоприятными. При проведении ГРП следует уделять особое внимание поискам «скрытого» оруденения золота путем учета наличия зон изменений при контактах разломов с горными породами.

(3) Юсицзихуа-Юнтай Чжужуфэн

В этом районе структуры разломов преимущественно имеют северо-восточное и восточное направления. Была выделена одна потенциально рудоконтролирующая структура СВ простирания с наличием интенсивных гидротермально-метасоматических изменений на поверхности: окремнение, пиритизация и лимонитизация. Общая оценка указывает на

благоприятные поисковые условия в этом районе. ГРР должны быть также ориентированы на поиски скрытого золотого оруденения вблизи зон изменений и разломов.

5. Выводы.

1. Район Дуньян стратегически расположен в “Золотом треугольнике” провинции Фуцзянь и характеризуется исключительными геолого-структурными условиями и многообещающим потенциалом минерализации. В этом исследовании были тщательно собраны и обработаны гравитационные данные района Дуньян и его периферии. Была проведена высокоточная магнитная съемка 1:50,000 масштаба в районе. Исследование включало комплексную обработку данных и извлечение информации из гравитационных и магнитных наборов данных, что способствовало тщательному изучению глубинных геологических структур.

2. Полученные данные свидетельствуют о хорошо развитой сети глубинных разломов, преимущественно ориентированных в северо-восточном и северо-западном направлениях. Всего было очерчено 39 предполагаемых рудоперспективных структур, в том числе: 19 северо-восточного, 18 северо-западного и 2 северного простираний. Благодаря интеграции региональных геологических данных были определены три перспективные площади для ГРР.

3. Проведенное исследование дает первоначальное представление о глубинных геологических структурах и их характеристиках для прогнозирования в районе Дуньян преимущественно скрытого золотого и др. оруденения.

4. Для получения более полного понимания рудоперспективных глубинных геологических структур региона необходимо проводить дополнительные комплексные методы геофизических поисков, такие как магнитотеллурическое зондирование и сейсмические исследования

VII. 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ СКРЫТОГО СКАРНОВОГО ОРУДЕНЕНИЯ (район Сюаньчэн–Магушань, Китай) [1].

1. Введение

Огромный поисковый потенциал заложен в «скрытом оруденении». В последние годы, с развитием компьютерных технологий и геофизических методов, технология 3D моделирования может полностью интегрировать многомерные данные для точного отображения глубинных геологических структур.

В настоящее время широкое применение искусственного интеллекта, особенно технологии машинного обучения, может обеспечить новый способ обработки больших объемов геологических данных. По сравнению с традиционными методами машинное обучение часто обладает более высокой точностью прогнозирования, особенно для геологических данных с массивными и многомерными характеристиками, что позволяет эффективно исследовать сложную нелинейную взаимосвязь между характеристиками рудного контроля и механизмами рудообразования.

Современные методы машинного обучения включают вероятностную нейронную сеть, машину опорных векторов, случайный лес, адаптивное обучение, ограниченную машину Больцмана и т.д. Большинство из них были применены и развиты в области 2DMPM. Эти методы, основанные только на двумерных геологических данных, не могут полностью обосновать прогнозирование глубоко скрытого оруденения. Комбинация 3D-технологий и искусственного интеллекта полезна для более полного сбора и интеграции прогнозной информации и достижения более точного позиционирования и количественных прогнозов глубоко скрытых рудных тел.

По сравнению с другими минерализованными участками четвертичные пласты в районе Сюаньчэн–Магушань в пределах металлогенического пояса реки Янцзы имеют большую мощность покрытия. Глубинная геологическая структура пока не ясна. В данном исследовании для района Сюаньчэн–Магушань сначала строится 3D геологическая модель, которая может точно описать глубинную геологическую структуру при поддержке геофизических методов и геологических данных. На основе этого были использованы два метода машинного обучения: модель логистической регрессии и модель случайного леса, для прогнозирования скарнового оруденения в трех измерениях. Затем разделяется обучающий набор и тестовый набор - первый обучает модель, а второй оценивает производительность модели. Были выбраны оптимальные результаты для определения поисковых целей.

2. Методы.

2.1. 3D-моделирование перспективности.

С развитием компьютерных технологий была предложена система методов МРМ, основанная на количественном анализе, которая способствует развитию прогноза от качественного к количественному и может более точно определять целевую область. Однако количественные методы МРМ в основном ориентированы на традиционное двумерное прогнозирование, которое в основном использует двумерные геологические данные. Поскольку в последние годы поисковые работы сосредоточены на глубокозалегающих скрытых рудах, исследования по количественному прогнозированию минерализации переместились из “двумерных” в “трехмерные”.

Развитие искусственного интеллекта также предоставляет собой новый способ обработки больших геологических данных, содержащихся в 3D моделях. В последние годы проводятся исследования в формате 3DMPM, в том числе с использованием модели взвешивания доказательств, модели логистической регрессии, модели случайного леса и модели искусственной нейронной сети. Эти методы могут эффективно обрабатывать большие многомерные геологические данные и стали важной тенденцией развития в этой области.

В этом материале интегрированы 3D-геологическое моделирование, 3D-пространственный анализ и 3DMPM, основанные на машинном обучении. Сначала на основе геологических данных создается 3D геологическая модель, а затем используются различные методы 3D пространственного анализа для 3D геологической модели и соответствующих металлогенических ориентировочных характеристик, чтобы получить количественный контроль руды и ориентировочную характеристическую информацию. Затем метод прогнозирования, основанный на машинном обучении, используется для прогнозирования скрытой минерализации и оценивается его эффект. Наконец, результаты прогнозирования используются для анализа металлогенической перспективной области, для реализации позиционирования и количественного прогнозирования скрытых рудных тел. Технологическая схема прогноза показана на рисунке 1.

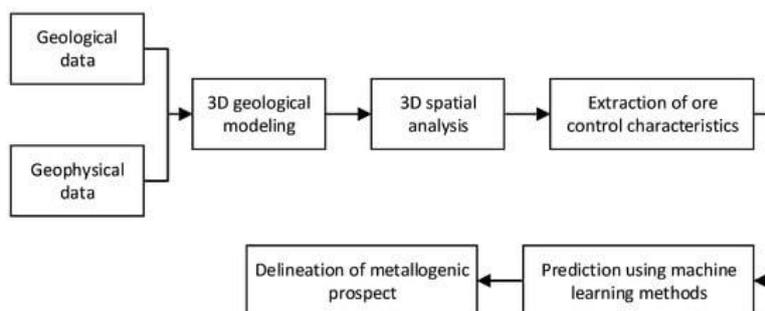


Рис. 1. Рабочий процесс трехмерного прогнозирования перспективности.

2.2. Алгоритм логистической регрессии.

Логистическая регрессия является репрезентативным алгоритмом в машинном обучении. Этот алгоритм применялся во многих областях, таких как медицина, биология и геология. Она может вычислять корреляцию между независимой входной переменной и зависимой переменной с помощью принципа регрессии и вычислять конкретное значение вероятности принадлежности зависимой переменной к определенной категории в соответствии с существующим состоянием независимой переменной. Как многомерная нелинейная регрессионная модель, она может лучше соответствовать нелинейной взаимосвязи между различными рудоконтролирующими характеристиками и металлогеническими фактами. В этом материале металлогенические факты используются в качестве зависимой переменной, а различные рудоконтролирующие факторы, связанные с металлогеническим механизмом, используются в качестве независимых переменных. Метод логистической регрессии вычисляет вероятность существования рудных тел в соответствующих блоках.

$$P(Z) = \frac{1}{(1 + e^{-Z})} \quad (1, 2)$$

$$Z = \alpha + \beta_i x_j$$

где $P(Z)$ - благоприятная степень минерализации, x_i - i -м рудным контрольным или индикаторным элементом, ($i = 1, 2, \dots, n$), α - постоянной величиной, β_i - фактором регрессии, то есть каждым контрольным вкладом рудных элементов в существование рудных тел.

Последний можно определить путем подгонки с помощью метода оценки максимального правдоподобия. Каждый параметр оптимально решается с использованием метода градиентного спуска.

2.3. Алгоритм случайного леса.

В модели коллективного обучения суть случайного леса заключается в классификаторе или регрессионной модели, состоящей из множества несвязанных деревьев решений: т. е. определяют категорию и, если это регрессионный сценарий, принимают среднее значение параметров решения в качестве конечного результата. Алгоритм обладает двумя важными характеристиками случайности. Первый - заключается в рандомизации образцов. Путем выполнения нескольких случайных извлечений с заменами из общего набора данных в качестве обучающих наборов получают несколько подмножеств из одного и того же числа выборок данных, чтобы уменьшить явление переобучения. Второй - заключается в рандомизации признаков. Для каждого дерева принятия решений из набора признаков извлекается другое подмножество признаков для изучения. Таким образом, может быть повышена надежность

выбора объектов, так что пользователю не нужно намеренно фильтровать объекты. В то же время могут быть получены важные показатели всех характеристик результатов модели.

Каждое дерево решений в случайном лесу выбирает объект, который может максимизировать информацию, полученную в подмножестве объектов, в качестве текущего узла разделения. Деревья решений множественной регрессии составляют алгоритм регрессии случайного леса. Основываясь на идее изучения ансамбля, среднее значение дерева решений принимается в качестве результата прогнозирования, а именно:

$$\bar{h}(x) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T h(x, \theta_t), \quad (3)$$

где $h(x)$ является результатом прогнозирования модели; $h(x, \theta_t)$ результат x на основе x сумма, является независимой θ_t переменная, θ_t является независимым и идентично распределенным случайным вектором, и T - количество деревьев принятия регрессионных решений.

3. Район исследования и данные.

3.1. Геологические предпосылки.

В силурийской и девонской толщах района преобладают обломочные породы, в пермской раннетриасовой и среднетриасовой толщах преобладают карбонатные породы, а в последующей континентальной - обломочные породы и серии пирокластических пород. Накопленная общая толщина достигает более 3000 м (рис. 2).

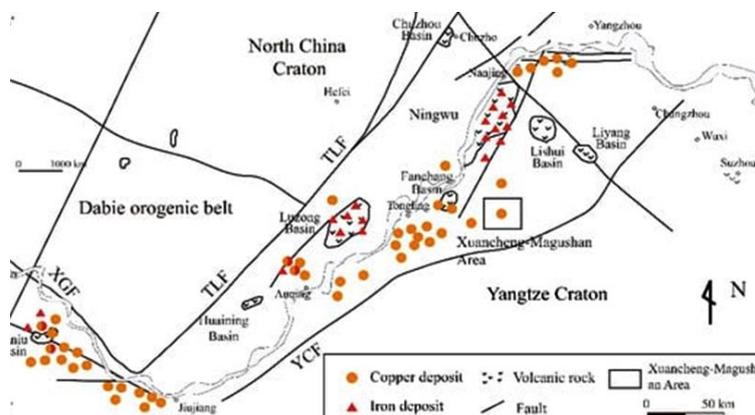


Рис. 2. Район Сюаньчэн–Магушань.

Структура исследуемого района сложна, и развились многочисленные разломы. Разломы в основном сосредоточены в юго-восточной части района. Активность магматических пород в этом районе высока, они состоят из среднекислотных интрузий позднего яньшаньского периода.

На исследуемой территории были обнаружены месторождения Магушань Cu-Мо, Сишишань Au-Pb, Бэйшань Cu-Мо и Фэнхуаншань Cu-Мо. Среди них месторождение Магушань

Cu-Mo (рис. 3) является типичным месторождением скарнов в этом районе, с большим масштабом и относительно высокой степенью изученности.

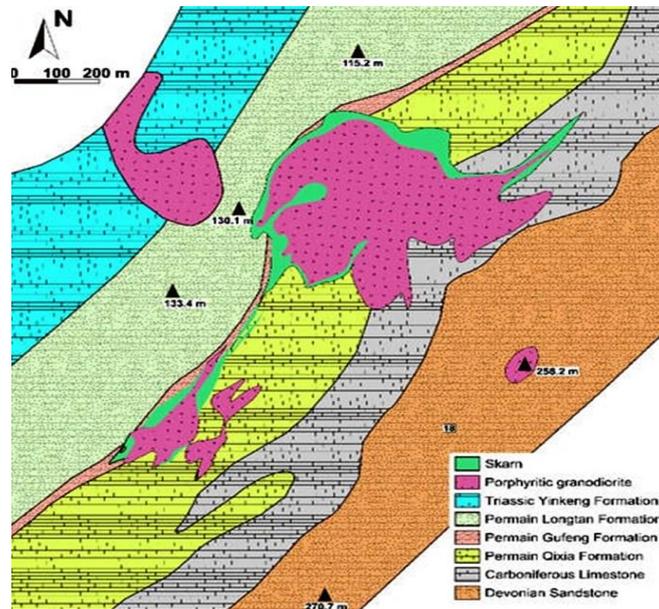


Рис. 3. Геологическая карта Магушанского Cu-Mo месторождения.

3.2. База данных.

В сочетании с предшествующими геологическими данными и на основе геофизических свойствах совместная инверсия гравитационного и магнитного полей позволила получить 2D-профиль, который показывает мощность, глубину, форму и др. массивов горных пород и геологическую структуру каждого слоя в регионе. Затем с использованием набора методов верификации, основанных на функции 3D визуализации была проверена достоверность полученных данных (рис. 4).

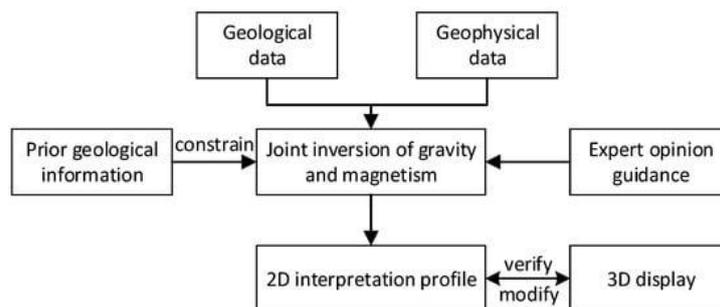


Рис. 4. Технологическая схема интерпретации гравитационной и магнитной инверсии.

Затем на основе полученных результатов создается 3D геологическая модель рудного поля Магушан глубиной 3 км. 3D-геологическая модель может реализовать визуализацию каждого геологического тела: мощность и глубина залегания, а также форма скрытого объекта. Дополнительно используется метод прямого геофизического моделирования для проверки достоверности 3D-геологической модели. Результаты моделирования показаны на рисунке 5.

Полученные результаты моделирования обеспечивают основную базу данных для исследований 3DMPM.

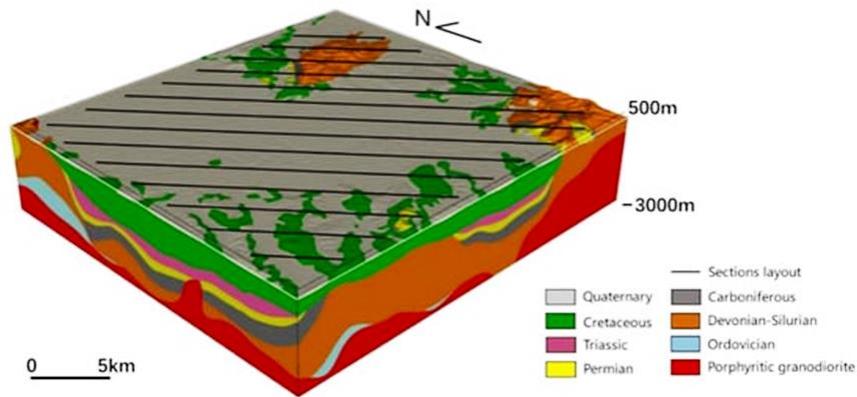


Рис. 5. 3D-модель района Сюаньчэн-Магушань.

3.3. Результаты 3D моделирования перспективности.

В качестве объекта исследования в исследуемом районе было выбрано Cu-Мо месторождение скарнового типа Магушан. Были обобщены металлогенические закономерности и поисковые признаки месторождения и была построена модель 3DMPM. Она включает в себя в качестве элементов прогнозирования стратиграфические поверхности контактов в каменноугольном, пермском и триасовом периоде, а также зона контакта массива диоритов.

После этого были извлечены элементы 3D прогнозирования (табл. 1).

Табл. 1.

Модель 3DMPM и элементы-индикаторы.

Classification	Exploration Criteria	Spatial Analysis Methods
Strata	Carboniferous stratigraphic contact surface distance field	3D geological body surface extraction function 3D Distance Field Analysis
	Permian stratigraphic contact surface distance field	3D geological body surface extraction function 3D Distance Field Analysis
	Triassic stratigraphic contact surface distance field	3D geological body surface extraction function 3D Distance Field Analysis
Intrusions	Rock mass contact zone distance field	3D geological body surface extraction function 3D Distance Field Analysis
Structures	Distance field of diorite uplift location	3D Mathematical Morphological Methods 3D Distance Field Analysis

Параметры 3D-модели показаны в таблице 2.

Пространственные параметры 3DMPM района Сюаньчэн–Магушань.

Parameter	Value (m)
North-south extent (x axis)	23,500
East-west extent (y axis)	21,500
Vertical extent (z axis)	500--3000
X axis block size	100
Y axis block size	100
Z axis block size	25

Прогнозируемая глубина находится в диапазоне -3000 м. Одна прогнозируемая кубическая единица определяется как 100 м×100 м×25 м. Прогнозируемая площадь составляет 7,0735 млн кубических единиц (рис. 6).

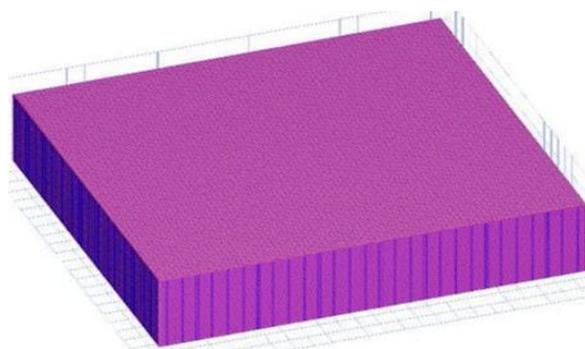


Рис. 6. Блок кубических единиц 3DMPM района Сюаньчэн-Магушань.

Чтобы проверить способность модели к прогнозированию было проведено разделение района на север и юг. Юг используется в качестве тренировочной зоны для изучения нелинейных характеристик оруденения, а север - в качестве тестовой зоны для проверки работоспособности модели. В исследуемой области известно 730 единичных блоков с рудными телами, все из которых используются в качестве положительных выборочных единиц, из которых 614 были помещены в обучающий набор, а 116 - в тестовый набор. Чтобы обеспечить баланс положительных и отрицательных проб, 1500 единиц нерудных тел вокруг известного рудного тела были отобраны в качестве отрицательных проб. Из них 1200 были включены в обучающий набор, а 300 - в тестовый набор.

4. Процесс и результаты моделирования перспективности.

4.1. Построение прогнозной модели.

Чтобы полностью изучить нелинейную взаимосвязь между 3D факторами, контролирующими рудообразование, и выявленным оруденением выбраны два метода машинного обучения, логическая регрессия и случайный лес, для 3D прогноза скрытого оруденения в рудном районе.

В дополнение к поддержке большого количества эффективных наборов данных, модель машинного обучения также должна устанавливать параметры модели для текущего набора данных, что является важным фактором в определении производительности модели. Алгоритм случайного леса включает в себя два наиболее важных параметра: количество деревьев принятия решений M и количество атрибутов K в случайно выбранном наборе атрибутов. Набор данных используется для определения соответствующего количества деревьев принятия решений и атрибутов модели классификации случайного леса с использованием перекрестной проверки. Благодаря регрессионной модели после получения оценок ошибок результатов каждого набора перекрестной проверки стандартное отклонение принимается в качестве стандарта для оценки согласованности модели на различных наборах данных (рис. 7).

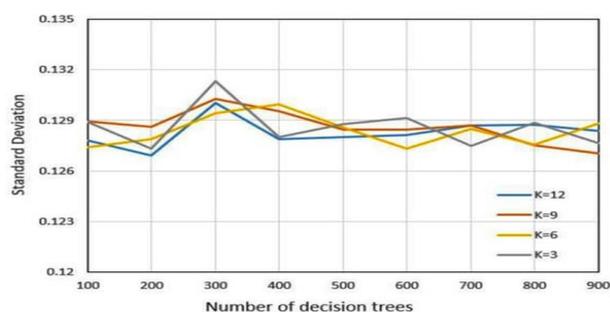


Рис. 7. Стандартные отклонения алгоритма random forest при различных параметрах.

Согласно результатам, в данной работе используются методы логистической регрессии и случайного леса ($M = 200$, $K = 12$) для проведения 3DMPM скрытого оруденения района Сюаньчэн–Магушань и получена карта распределения перспективных участков (рис. 8).

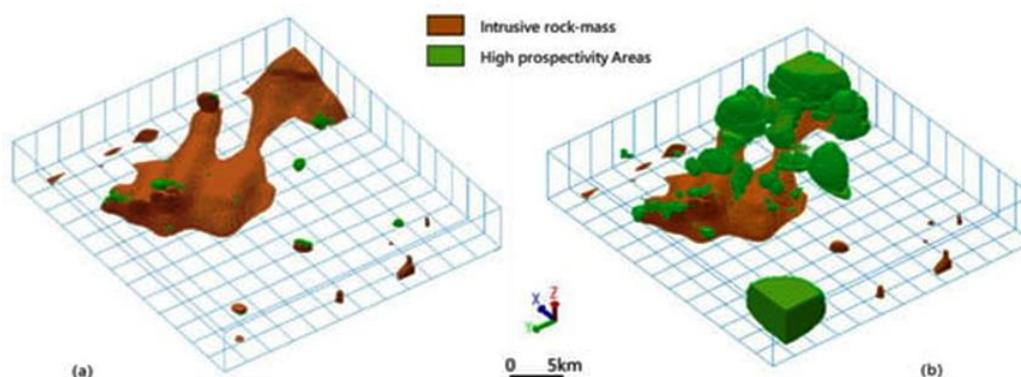


Рис. 8. Распределения благоприятных участков, (a) результаты модели случайного леса; (b) результаты модели логистической регрессии.

4.2. Анализ эффективности модели.

Матрица путаницы является стандартным форматом для выражения оценки точности. Она часто используется в сценариях бинарной классификации. Каждый столбец матрицы представляет прогноз образца, а каждая строка матрицы представляет реальную ситуацию с образцом. Чтобы более интуитивно выразить качество работы модели, расширили три

показателя из матрицы: точность, повторяемость и специфичность. Обученная модель используется в наборе тестов, описанных выше, для проверки производительности модели. Согласно результатам, блоки с благоприятной степенью минерализации, превышающей 0,5 выбираются в качестве благоприятных единиц для минерализации. Наконец, сравнивается реальный и прогнозируемый вес каждого блока в тестовом наборе и используются эти три прогнозных показателя для сравнения модели (табл. 3).

Табл. 3.

Сравнение показателей эффективности.

Models	Accuracy	Recall	Speciality
Logistic regression	90.625%	83.62%	93.33%
Random forest	96.63%	93.97%	97.67%

Сравнивая три показателя эффективности, можно сделать вывод, что модель случайного леса работает лучше, чем модель логистической регрессии, которая может эффективно различать единицы нерудных тел в случае прогнозирования большего количества известных рудных тел в тестовом наборе и обладает хорошей способностью к обобщению.

Кривая ROC также часто используется при оценке эффективности двух классов сети. Она может указывать на способность идентифицировать образец при определенном пороге. Вертикальные и горизонтальные координаты точек на кривой представляют истинную положительную скорость (TPR) и ложноположительную скорость (FPR) выходных результатов при различных пороговых значениях соответственно. Кривая ROC показывает процент истинно положительных единиц в известных единицах минерализации в различных диапазонах положительных прогнозов модели. Площадь под кривой называется значением AUC. Чем больше значение AUC, тем лучше эффект модели. В данном материале сравниваются ROC-кривые двух моделей (рис. 9) и обнаруживается, что изображение метода МРМ, основанного на случайном лесе, более наклонено к верхнему левому углу, чем модель логистической регрессии. Значения AUC двух моделей равны 0,989 и 0,969, что указывает на то, что модель случайного леса обладает лучшей производительностью и более надежными результатами.

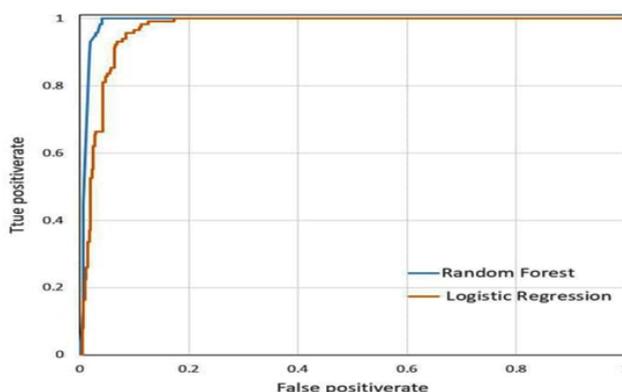


Рис. 9. Сравнение ROC-кривых.

Эффективность двух моделей была дополнительно количественно оценена путем построения кривых эффективности улавливания (рис. 10).

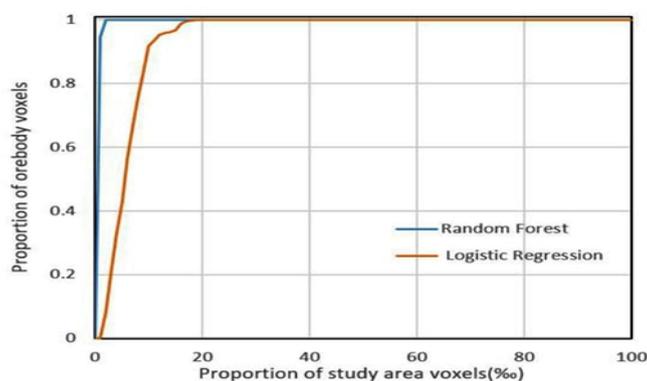


Рис. 10. Кривые эффективности улавливания.

Сначала прогнозируемая металлогеническая благоприятность всех блоков сортируется в порядке убывания. Затем в соответствии с результатами сортировки устанавливаются различные пороговые значения для реклассификации единичных блоков в исследуемой области. Наконец, эффективность улавливания рассчитывается путем подсчета количества рудных тел в разных разрезах. Процесс расчета эффективности улавливания заключается в выполнении статистических расчетов по всем блокам в исследуемой области. Из кривой эффективности улавливания можно получить, что блоки в верхних 4% металлогенической благоприятной степени, предсказанной моделью случайного леса в исследуемом районе, могут покрывать все известные рудные тела. В результатах модели логистической регрессии только блоки в верхних 20% благоприятной степени минерализации в исследуемом районе могут покрывать все известные рудные тела. Можно показать, что случайный лес может содержать больше известных единиц рудных тел в блоке с высокой апостериорной вероятностью и может более точно отсеивать перспективную металлогеническую область.

5. Обсуждение.

После анализа показателей модели логистической регрессии и модели случайного леса можно увидеть, что результаты прогнозирования модели случайного леса лучше. Точность модели случайного леса в тестовом наборе составляет 96,63%, что выше, чем у модели логистической регрессии на 6,005%, т.е. на 10,35% выше по повторяемости и на 4,34% выше по специфичности, что указывает на то, что случайный лес может лучше характеризовать характеристики оруденения в исследуемом районе. В то же время, по сравнению с логистической регрессией, модель случайного леса может лучше идентифицировать характеристики рудных тел и может охватывать больше известных единиц рудных тел в том

же количестве блоков с высокой степенью металлогенической перспективности. Сравнивая распределения и формы перспективных участков, предсказанных двумя методами, можно видеть, что случайный лес может более точно определять конкретные местоположения перспективных объектов, тем самым эффективно повышая эффективность поисковых работ.

В этом материале результаты прогнозирования случайного леса используются для определения металлогенической целевой площади, и в качестве потенциальной металлогенической единицы выбран единичный блок со степенью металлогенического благоприятствования более 0,5.

Согласно результатам прогноза, на исследуемой территории насчитывается 7652 перспективных участка, что составляет 1,08 % от всей исследуемой площади, включая 96,71 % известных рудных тел. Таким образом, модель случайного леса может не только эффективно идентифицировать известные рудные тела, но и выделять блоки с большим металлогеническим потенциалом. В результате выделяются пять металлогенически потенциальных участков (рис. 11).

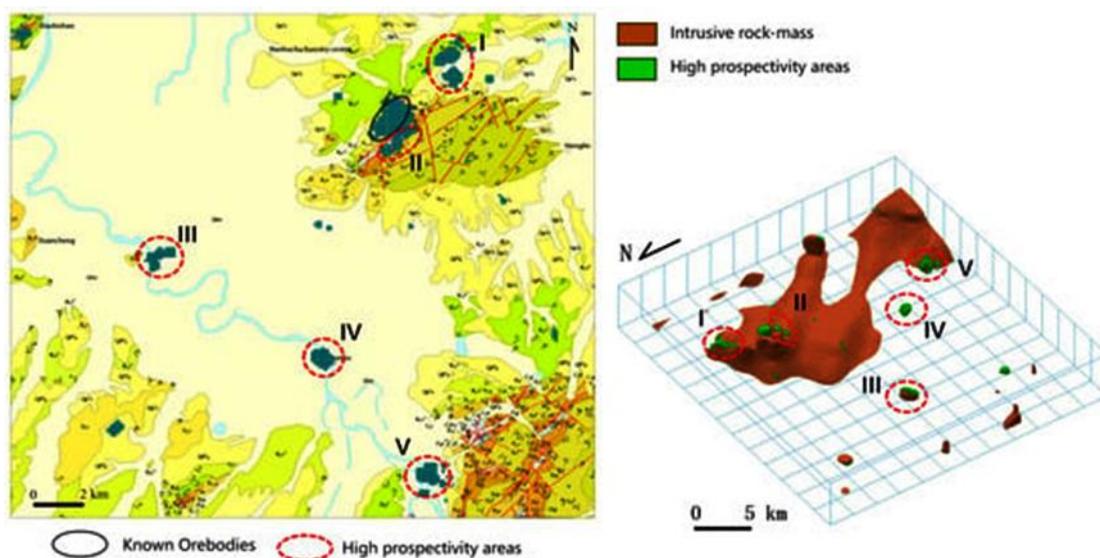


Рис. 11. Определение целевых зон поиска.

Все пять перспективных участков обладают высоким потенциалом. Целевые участки № I и № II расположены в рудном районе Магушан. Глубина залегания целевого участка № I составляет около -900 м ~-1200 м, а глубина залегания целевого участка № II составляет около -1500 м ~-2000 м. Целевая область расположена в центре аномалии высокой силы тяжести. Аэромагнитная аномалия Магушан демонстрирует тенденцию плавного изменения градиента к югу, показывая положение скрытого интрузивного массива. Геохимические водные аномалии съемки масштаба 1:200 000 показывают, что Cu, Hg и W аномальны вблизи месторождения Магушан.

Целевая область III расположена над телом с высокой плотностью, ее глубина составляет около -2100 м ~-2800 м.

Целевая зона IV контролируется нескрытым интрузивным телом, глубина залегания составляет около -1100 м ~-1500 м.

Целевая область № V расположена на пересечении разломов и сопровождается магнитными аномалиями, глубина залегания составляет около -2100 м ~-2900 м.

Все пять перспективных участков, классифицированных в этом материале, могут быть приоритетными объектами будущих поисков скрытого оруденения этом рудном районе.

6. Выводы.

1. 3DMPM является важным инструментом для определения глубинных скрытых объектов для поисков.

2. В результате его использования были определены пять перспективных участков с хорошим потенциалом скрытого оруденения в районе Сюаньчэн-Магушань, которые могут быть объектами будущих поисков.

3. В районе Сюаньчэн–Магушань перспективные участки, выделенные с помощью модели случайного леса, содержат 96,71% известных рудных тел, что составляет только 1,08% исследуемой площади, что показывает, что эта модель работает лучше, чем модель логистической регрессии. Это может обеспечить более эффективные и точные результаты 3DMPM

VIII. 3D-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ПРОГНОЗЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА КАМАСТСКОГО ТИПА (Восточно-Джунгарский бассейн, С-З Китая) [8].

1. Введение

На международном уровне технология трёхмерного моделирования месторождений урана быстро развивается при поддержке МАГАТЭ. Однако в Китае методы разведки месторождений урана традиционно были двухмерными, а трёхмерное геологическое моделирование и визуализация месторождений урана всё ещё находятся на стадии становления.

Трёхмерное количественное прогнозирование и оценка — передовой метод геологического анализа, использующий трёхмерные пространственные вычисления и методы анализа. К ним относятся топологический и атрибутивный анализ твёрдых объектов в сочетании с теориями рудообразования для выявления областей, благоприятных для минерализации урана, и ключевых контролирующих факторов. Применение трёхмерной количественной модели прогнозирования позволяет извлекать прогнозирующие переменные и проводить комплексный анализ для определения потенциальных зон минерализации, что приводит к более точной оценке потенциала минеральных ресурсов.

Месторождения урана в песчаниках, обладающие значительными преимуществами в плане ресурсного обеспечения, экономической целесообразности и воздействия на окружающую среду, приобретают всё большее значение. Их пригодность для экономически эффективного выщелачивания на месте, крупные запасы и минимальное воздействие на окружающую среду при добыче делают их особенно привлекательными. В результате они являются центром внимания при текущей разведке урановых ресурсов в Китае.

В Китае выявлено более 50 месторождений урана пачанникового типа, которые составляют 14,5% от общего количества месторождений урана в стране и составляют 43,1% от общих выявленных ресурсов урана, которые находятся в основном в крупных северных осадочных бассейнах, таких как бассейны Или, Ордос, Джунгар и Эрлиан. С развитием технологий и ростом спроса на урановые ресурсы геологоразведочные работы всё больше ориентируются на глубину и точность, объединяя передовые методы, такие как трёхмерное геологическое моделирование и количественные методы оценки.

Камустское месторождение урана, расположенное в восточной части Джунгарской впадины, представляет собой месторождение среднего размера с содержанием урана в руде от 0,0153% до 0,1103% и содержанием урана на квадратный метр от 1,12 до 10,91 кг/м². Предыдущие исследования Камустского месторождения урана ограничивались двумерным анализом, в результате чего глубинные геологические условия оставались практически

неизученными в трёх измерениях. Цель этого исследования — обобщить и проанализировать региональные механизмы рудообразования, рудоконтролирующие элементы и поисковые признаки для создания комплексной геологоразведочной модели Камустского месторождения урана. С помощью методов трёхмерного геологического моделирования и визуализации была создана ключевая модель зоны пластового окисления. Эта модель имеет решающее значение для выявления благоприятных для образования руды участков и обеспечивает углублённую разведку. Переход от двумерного к трёхмерному анализу расширяет понимание сложной геологии месторождения и повышает эффективность будущих разведочных работ, устраняя текущие ограничения и демонстрируя потенциал передовых методов моделирования при поисках и разведке урана.

2. Геологические условия исследуемой территории.

Месторождения урана Камустского типа расположены в восточной части Джунгарской впадины, между горными хребтами Каламили и Цингельды. Они являются частью Улунгурского урановорудного пояса в составе Алтайско-Джунгарской металлогенической провинции. Выделены три металлогенические зоны, разделенные разломами Каласайи и Хунпэн, а именно: восточная часть поднятия Дибэй, южная часть впадины Суосуоцюань и южная часть зоны разлома Хунъян (рис. 1).

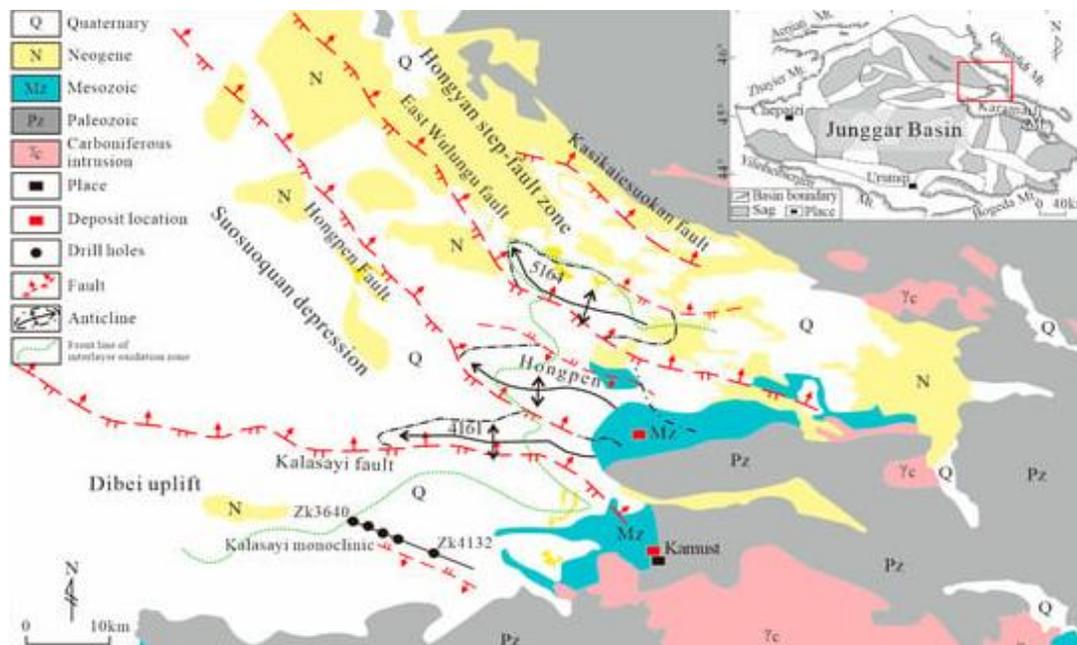


Рис. 1. Геологическая карта Камустского месторождения урана.

Направления разломов расходятся от восточного конца в районе гор Цингелиди и Каламайли, образуя воронкообразное распределение. Характеристики структурных

деформаций различаются в восточной и западной частях площади. На западном, расходящемся конце «воронкообразной структуры» деформации менее интенсивны, с менее выраженными разломами и складками. Напротив, на восточном, конвергентном конце наблюдаются более интенсивные деформации с чётко выраженными разломами и чередованием поднятий и впадин, включая последовательное формирование моноклинали Каласайи, антиклинали 4161, антиклинали Хонгпен и антиклинали 5164.

Коренные породы в районе Камуст состоят из докембрийского кристаллического и герцинского складчатого метаморфического фундамента. Палеозойские пласты в основном состоят из морских обломочных пород и герцинских гранитов. Осадочный чехол имеет триасовый, юрский, меловой и кайнозойский возраст. На урановую минерализацию в районе Камуста значительное влияние оказывают стратиграфические, структурно-геологические и палеоклиматические факторы. Преобладающей формой урановой минерализации является песчаниковой тип, встречающийся в послонных зонах окисления. Примечательно, что рудные тела преимущественно находятся в пойменных речных песчаниках среднеюрской формации Тутунхе. Обнаруженная урановая минерализация в основном находится в юрских пластах, наиболее представительными из которых являются среднеюрские, а также верхнемеловые отложения группы Тугулу. Залежи урановой руды в основном находятся в сероцветных и окисленных песчаниках и конгломератах среднеюрской формации Тутунхе. Формация Тутунхе разделена на верхнюю и нижнюю части. Нижняя часть представлена пестрыми, серыми и серо-зелёными конгломератами и песчаниками, перемежающимися тонкими слоями аргиллита и углистого аргиллита, и характеризуется более мощными телами песчаников. Верхняя часть представлена чередой мощных пластов пестроцветных мелкозернистых аргиллитов, перемежающихся с тонкими слоями песчаника.

3. Ключевые рудолокализирующие факторы и поисковая модель.

Внутренние и внешние источники урана.

Для формирования месторождений урана в песчаниках необходима достаточная концентрация урана. Промежуточные кислые магматические породы в Каламжайском орогенном поясе, расположенном к югу от района Камуст, богаты ураном и содержат значительную долю активного урана, способного мигрировать в процессе минерализации. Эти породы не только внесли значительный вклад в обогащение ураносодержащим обломочным материалом рудоносной формации во время осадочной фазы, но и высвободили значительное количество растворённого U^{6+} во время последующей минерализации. Это высвобождение способствовало образованию ураносодержащих окисленных вод, которые послужили

существенным внешним источником урана для процессов окисления и минерализации месторождения Камуст.

Структурный контроль оруденения.

Начиная с юрского периода, региональный тектонический режим в районе Камуста неоднократно выводил на поверхность юрские песчаные пласты, сформировавшиеся в пределах моноклинали Каласайи, создавая топографическую особенность, при которой территория возвышается на юге и опускается к северу. Эта топография создала благоприятные условия для последующего проникновения и изменения под воздействием насыщенной кислородом воды, богатой ураном. В то же время моноклинали Каласайи в сочетании с разломом Каласайи образуют эффективную систему циркуляции грунтовых вод. Направление движения грунтовых вод часто совпадает с наклоном склонов. Зоны разломов, характеризующиеся раздробленностью горных пород, как правило, обладают более высокой проницаемостью и служат путями движения грунтовых вод. В рамках этой системы грунтовые воды могут пополняться и перемещаться что способствует их циркуляции, обновлению и усиливает взаимодействие между грунтовыми водами и горными породами. Такое взаимодействие благоприятно для дальнейшего развития межслойных зон окисления и формирования месторождений урана песчаникового типа.

Литофациальный контроль оруденения.

В формации Тутунхе сформировалась серия пойменно-дельтовых обломочных отложений, характерных для равнины на краю бассейна. Пойменно-дельтовая равнина характеризуется хорошо развитыми русловыми каналами и мощными песчаными отложениями. Литология этих песчаных тел в основном состоит из полевошпатового литогенного песчаника. Обломочные компоненты в основном состоят из средне-кислых магматических пород, кварца и полевого шпата. Эти компоненты имеют рыхлую структуру, что обеспечивает хорошую проницаемость, способствующую проникновению насыщенной кислородом воды, содержащей уран. Такая литологическая и литофациальная обстановка создаёт благоприятные условия для отложения урановых руд на месте залегания.

Послойное окисление.

Формация Тутунхе характеризуется слабо восстановительной геохимической средой, которая способствует крупномасштабной межслойной инфильтрации воды и процессу окисления. Вдоль края бассейна преобладает приповерхностное окисление с переходом к межпластовому окислению по мере продвижения вглубь бассейна. Зона межпластового окисления в пределах этого района отличается хорошей латеральной непрерывностью и обширным охватом, при этом различные сегменты зоны окисления взаимосвязаны на

региональном уровне. Зона окисления простирается примерно на 8 км в длину и имеет мощность от 30 до 70 м. Ширина зоны точно не определена из-за недостатка данных о бурении.

Характеристики уранового оруденения.

Урановые руды в районе в основном расположены в зоне межпластового окисления среднеюрской формации Тутунхе. Промышленные руды расположены на глубинах от 340 до 820 м. Пласты залегают под углом от 3° до 8°, их мощность варьируется от 1,10 до 8,10 м, а содержание урана — от 0,0153 до 0,1103%. Содержание урана на квадратный метр составляет от 1,12 до 10,91 кг/м². Форма рудных тел в поперечном сечении преимущественно пластинчатая и пластовая (рис. 2). Минерализованные песчаные тела характеризуются слабой цементацией и хорошей проницаемостью, они демонстрируют многообещающий ресурсный потенциал и благоприятные условия для поисков.

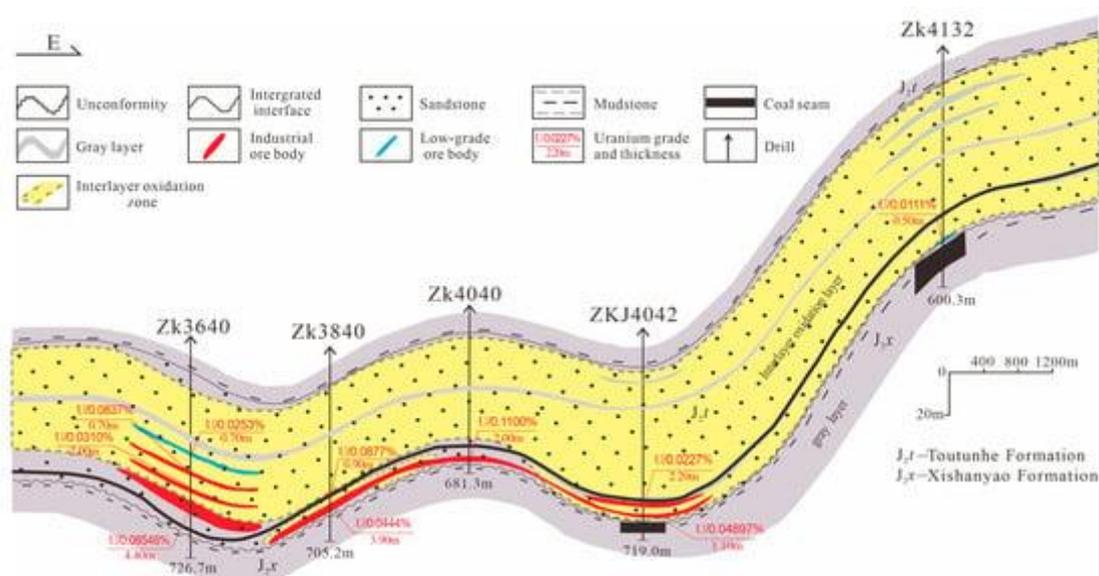


Рис. 2. Профиль распределения межпластового окисления и рудных тел Камустокского месторождения урана.

4. Обработка данных и процесс 3D-моделирования.

В этой статье используется интегрированная программная платформа GoCad для геологического и гидродинамического моделирования, разработанная компанией Paradigm, для трёхмерного геологического моделирования с визуализацией. Метод дискретной сглаженной интерполяции (DSI), лежащий в основе программного обеспечения GoCad для геологического моделирования, обладает рядом преимуществ, в том числе возможностью выбора моделей сеток, автоматической настройкой конфигураций сеток, интерактивными возможностями в реальном времени и способностью работать с неопределёнными данными. Эти преимущества делают его важным инструментом для геологического моделирования и визуализации.

Первичные данные, собранные для месторождения Камуст в Джунгарской впадине, включают региональные геологические карты, данные о бурении, схемы разведочных профилей и другие соответствующие геологические материалы. Учитывая их различное происхождение, обширные временные рамки и несовпадающие стандарты, эти данные характеризуются многообразием источников, масштабов и разрешений. Чтобы оптимизировать использование существующих данных, необходимо стандартизировать исходные данные в формате, совместимом с программным обеспечением для моделирования, импортировать их в платформу GoCad и создать интегрированную геологическую базу данных. Используя технологию 3S, технологии баз данных, трёхмерную визуализацию и технологии виртуальной реальности, созданы трёхмерные модели скважин, структурной геологии, стратиграфии, зон межслойного окисления, рудных тел и рудных районов. Такой подход позволяет получить полное трёхмерное пространственное представление о различных геологических телах и структурных системах.

С помощью данных о бурении серии разведочных профилей можно построить структурно-стратиграфическую модель, объединив поверхностное моделирование с моделированием горных пород (рудных тел). Поверхностное моделирование включает в себя создание контурных линий и очертаний геологических слоёв на основе данных о буровых скважинах и информации о разведочных профилях. Эти контуры обозначают границы геологических слоёв, указывая на их мощность, наклон и взаимосвязи. С другой стороны, моделирование рудных тел фокусируется на форме, объёме и физических свойствах конкретных горных пород, представляя их пространственную структуру с помощью построения трёхмерных сеток, например, треугольных. Этот тип моделирования обеспечивает большую детальность. Сочетание поверхностного и трёхмерного моделирования использует преимущества обоих методов, что делает его подходящим как для мелкомасштабного регионального трёхмерного геологического моделирования, так и для крупномасштабного трёхмерного моделирования месторождений урана. Такой комплексный подход позволяет более полно представить сложность и разнообразие геологических характеристик.

Процесс моделирования выглядит следующим образом. Сначала используется информация о характеристиках скважин и бурового керна. Данные о характеристиках скважины включают сведения о стратиграфии, литологии, зоне окисления между слоями и содержании руды. Эти данные в виде табличных файлов и импортируют в GoCad для создания базы данных о скважинах, извлекая отдельные элементы для стратиграфии и литологии. Контурные линии пластов, зон межпластового окисления, рудных тел и разломов из диаграмм профиля разведки, используется для ограничения поверхностей моделирования на основе

пространственного положения, геометрической формы и данных скважин. Затем строятся сплошные треугольные сетки между соседними контурными линиями для пластов, зон межпластового окисления, рудных тел и разломов. В случаях, когда имеются значительные различия в геометрии контурных линий, могут быть введены дополнительные вспомогательные контурные линии. Замкнутые контурные линии, такие как линии межслойных зон окисления и рудных тел, обрабатываются для замыкания, а граничные контурные линии экстраполируются, образуя замкнутые пространства, что позволяет завершить модель для этих объектов. Между открытыми линиями пластов и разломов создаются сплошные треугольные сетки для завершения модели. Затем проверяется эффективность и замкнутость для получения окончательной модели поверхности и сплошных объектов.

Метод “Кубической модели прогнозирования” является расширением блочной атрибутивной модели, которая включает преобразование установленной трехмерной твердотельной модели в сеточную систему с ячейками одинакового или переменного размера. Этот метод присваивает геологические, геофизические и геохимические данные каждой ячейке сетки, позволяя количественно оценить эти атрибуты. Эта количественная оценка помогает в классификации, анализе, извлечении и вычислении данных из нескольких источников, повышая точность геологических прогнозов.

В этом исследовании, используя трёхмерную геологическую модель месторождения Камуст, устанавливаются особенности формирования урановой руды песчаникового типа. Сопоставляя рудные тела с различными геологическими факторами, создается поисковая модель. При «кубической модели» используются блоки размером 300 м × 300 м × 50 м в качестве основных единиц прогнозирования для построения атрибутивной модели. Размеры этих кубических блоков определены с учетом обширной минерализационной оболочки и тонкости минерализованных слоев, которые типичны для месторождений урана песчаникового типа, а также с учетом вычислительной эффективности. Каждая кубическая ячейка в блоках наделена геологическими свойствами, определяющими благоприятные условия для рудообразования в пределах каждого прогнозируемого элемента, что позволяет получить количественную модель прогнозирования для исследуемой территории. “Метод количественной трехмерной информации” применяется как для качественной, так и для количественной оценки каждого элемента прогноза. Затем области с высокими значениями количества информации о рудных месторождениях определяются как перспективные цели для поисков. Для оценки количества ресурсов в выделенных благоприятных и перспективных областях применяется алгоритм интерполяции методом кригинга, что позволяет

дополнительно оценить вероятность обнаружения руды. Этот комплексный подход направлен на получение эффективных прогнозов о формировании урановых месторождений в Восточном Джунгарском бассейне.

5. Результаты 3D моделирования урановорудного района Камуст.

Был собран широкий спектр данных, включая геологические карты, данные геологоразведки, геофизические, геохимические и данные дистанционного зондирования. Данные были представлены в различных форматах, таких как сетка, векторные и текстовые данные, как показано в таблице 1. После ряда подготовительных этапов, включая стандартизацию текстовых данных, корректировку данных изображений, векторизацию, трёхмерное преобразование и другие необходимые обработки, данные были интегрированы в платформу GoCAD для создания комплексной геологической базы данных. Используя набор технологий, в том числе технологию 3S, технологию баз данных, трёхмерную визуализацию и виртуальную реальность, создаются трёхмерные модели, охватывающие скважины в районе исследования, зоны межслойного окисления, структурные особенности, геохимические и геофизические исследования. Эти модели упрощают визуализацию, трёхмерное представление и количественный анализ пространственного распределения и взаимосвязей между различными геологическими телами и структурными системами (рис. 3, табл. 1).

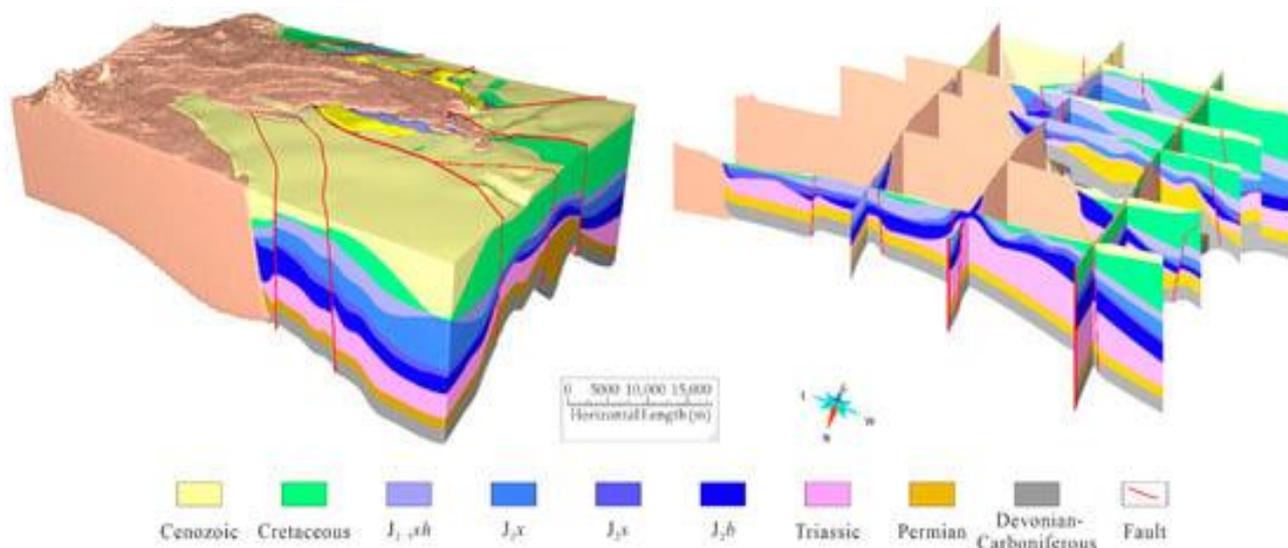


Рис. 3 Трёхмерная комплексная модель района Камуст.

На модели видно, что пласты постепенно поднимаются к востоку, разломы имеют упорядоченную структуру, а также имеются явные признаки опускания и поднятия блоков, что делает модель гладкой и визуально привлекательной.

Модель количественного прогнозирования урановых месторождений района Камуст..

Deposit Types	Ore-Controlling Factors	Geological Feature	3D Spatial Reconstruction of Mineralization Anomalies	Characteristic Values
Sandstone-type uranium ore	Strata	Mineral-bearing characteristics of the stratum	Favorable ore-forming rock series; ore-bearing stratum	Sandstone layer; Toutunhe, xishanyao, and sanguhe formations; 200 m buffer zone
	Structures	Tectonic zone characteristics	Fault buffer zone	800 m buffer zone around faults
		Tectonic development and distribution characteristics	Azimuthal anomaly degree	(0.8-1)
		Structural ore-controlling factors	Favorable ore-forming location	Ore-hosting space in slope belt of basin margin
	Oxidation zone	Interlayer oxidation zone model	Ore migration pathway	Toutunhe oxidation zone

Модель скважины.

Скважины являются основой трёхмерного геологического моделирования, предоставляя критически важные данные для таких проектов. Эти данные в первую очередь включают информацию о местоположении скважины и сведения о её характеристиках. Информация о местоположении включает данные о положении и отклонениях, а сведения о характеристиках состоят из стратиграфической, литологической, структурной, рудной и окислительно-восстановительной информации. Эти наборы данных импортируются в программную платформу GoCAD, где они используются для ограничения поверхностей при моделировании объектов, обеспечивая точность и качество процесса моделирования.

Структурно-стратиграфическая модель.

Эта модель описывает основные структуры разломов в районе Восточного Джунгарского Алатау. Район Камуст разделён на три вторичные структурные единицы разломами Каласай и Хонгпен, а именно: восточная часть поднятия Сангэкван, южная часть впадины Суосуоцюань и южная часть зоны разлома Хонгян (рис. 1). Используя интегрированную геологическую базу данных, создаётся структура стратиграфической колонки, определяются стратиграфические контакты, включаются стратиграфические данные, вводятся информация о разломах, классифицируются типы разломов и создаётся их модель. Этот процесс включает создание поверхностей разломов и моделей стратиграфических поверхностей. Уточняются данные моделирования в сочетании с сейсмической интерпретацией и другими наборами данных, корректируются стратиграфические поверхности, определяются структурные контакты и выполняются другие операции для моделирования пространственного распределения, положения и взаимопересечения стратиграфических поверхностей или поверхностей разломов.

На протяжении всего этого процесса особое внимание уделяется роли точек вскрытия пластов в скважинах при корректировке геологических поверхностей и используется модуль анализа смещений разломов для эффективного выполнения требований моделирования. Структурно-стратиграфическая модель объединяет данные из скважин, пластов, структур, геохимические и геофизические интерпретации, а также геологические карты. Перед моделированием необходимо определить стратифицированные данные и присвоить им геологическую значимость.

Итоговая модель включает в общей сложности девять стратиграфических поверхностей, а именно Q+E, K, J_{2-3sh}, J_{2x}, J_{1s}, J_{1b}, T, P, C, D, и девять поверхностей разломов,

Модель зоны межпластового окисления.

Исследования в районе Камуст выявили значительные зоны окисления между пластами в формациях Тутунхэ и Сишаньяо средне-юрского возраста. Учитывая, что на развитие межпластовых зон окисления существенно влияет распределение песчаных тел, для построения модели зон окисления используется модель слоистой породы (рис. 4).

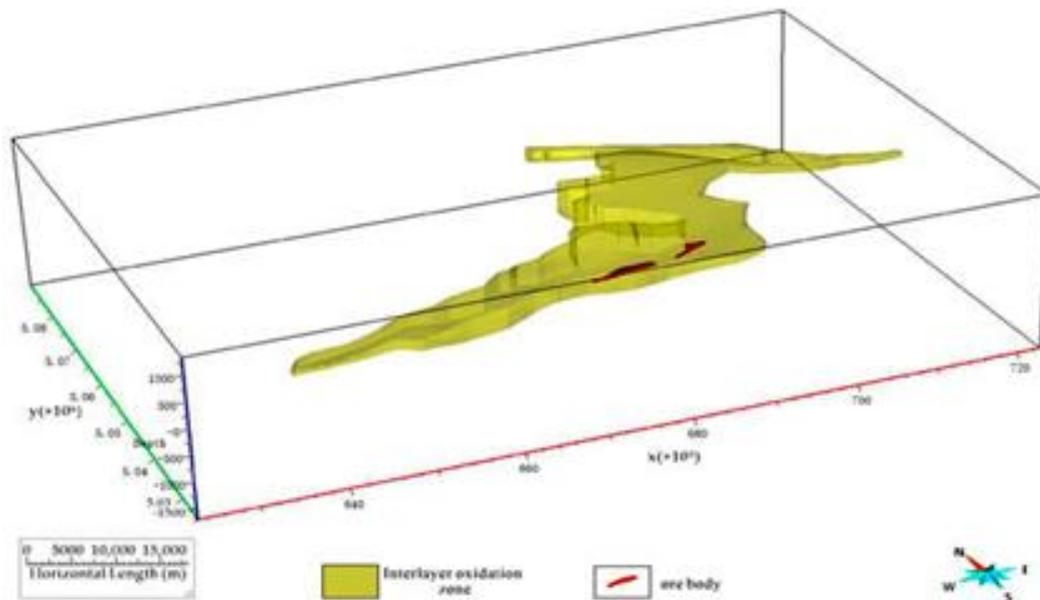


Рис. 4. Трехмерная модель межпластовой зоны окисления формации Тутунхе.

Модель района источника.

Основным источником урана для месторождений в песчаниках являются области выветривания на краю бассейна. Широкое распространение магматических пород средней кислотности на периферии района обеспечивает значительное количество ураносодержащего детрита, который является богатым источником урана для последующих процессов окисления и изменений. Для верхней поверхности модели зоны выветривания используются топографические данные, а для нижней поверхности — граница распространения

каменноугольных пластов (D). Добавленные вручную контрольные линии обогащают морфологию геологического тела в районе источника выветривания.

Модель области выветривания построена с использованием сложного моделирования горных пород (рис. 5).

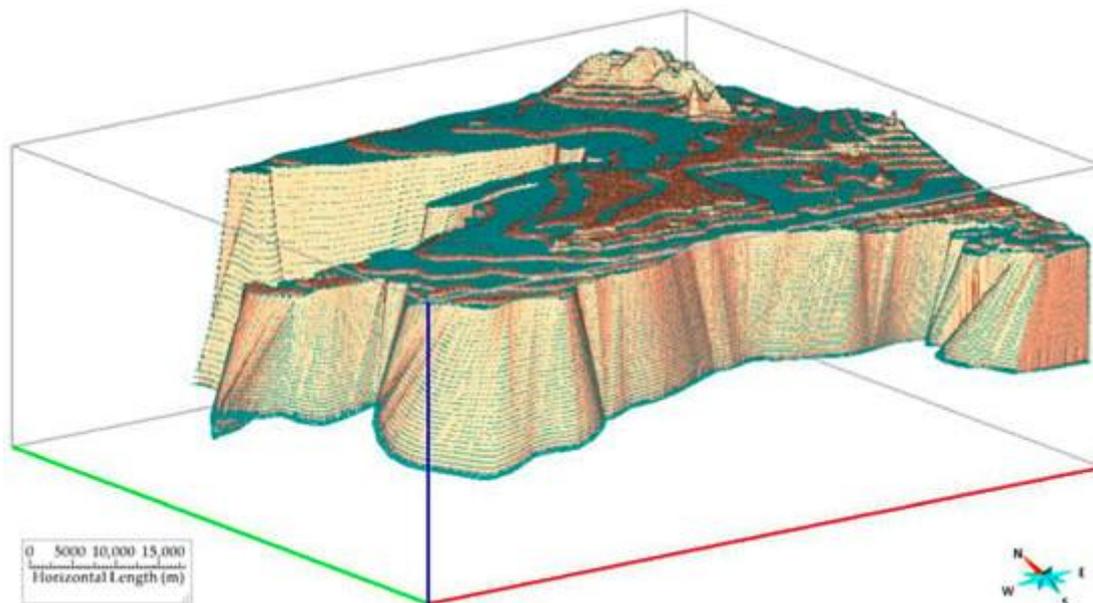


Рис. 5. Трехмерная модель области источника Камустских урановых месторождений.

Наблюдения за моделью показывают, что геологическое тело в основании области выветривания простирается глубоко в центральную часть Джунгарской впадины.

6. Прогнозирование уранового оруденения.

В качестве основных элементов прогнозирования взяты кубические блоки (300 м × 300 м × 50 м) и, в соответствии с масштабами, выделяются в общей сложности 7 800 000 блоков.

Извлечение прогнозной стратиграфической информации.

В районе Камуст основными пластами, на которые ориентируются при прогнозировании, являются неогеновые, палеогеновые, меловые, среднеюрские формации Тутунхэ (J_{2t}), Сишаньяо (J_{2x}), нижнеюрские формации Сангонгхэ (J_{1s}), Бадаован (J_{1b}), триасовые (T), пермские (P) и каменноугольные (C) пласты. Используя стратиграфическую модель и модель рудных тел, ограничиваются атрибуты диапазона кубических блоков. Затем выполняются расчёты их пространственной корреляции с рудными телами, после чего проводится статистический анализ ограниченных стратиграфических атрибутов в пределах кубических блоков.

Геологические статистические данные (табл. 2) показывают, что формации Тутунхэ, Сишаньяо и Сангонгэ оказывают значительное влияние на формирование рудных тел. В этом

исследовании верхняя и нижняя 100-метровые части этих стратиграфических границ рассматриваются как межформационная рудообразующая зона. Примечательно, что в пределах 200-метровой межформационной границы формации Сишаньяо находятся 410 из 416 известных рудных тел, что составляет 98% от общего числа.

Табл. 2.

Таблица информационной энтропии элементов минерализации в Камустском районе.

Information Layer Name	Number of Marked Units	Number of Information Layer Units	Amount of Information
Xishanyao Formation	146	618,117	0.249034
Toutunhe Formation	402	600,610	0.701386
Oxidation zone	261	103,523	1.277356
Inter-group buffer zone of Xishanyao Formation	410	308,797	0.998863
Fault Buffer Zones	18	70,808	0.280942
Azimuthal Anomaly	51	140,897	0.432959

Извлечение информации о структурных зонах.

Локальные поднятия на границах осадочных бассейнов создают благоприятные условия для формирования руды, особенно в зонах тектонических склонов, которые способствуют миграции. Богатая кислородом вода, содержащая уран, мигрирует вдоль слоёв песчаника, осаждаясь на фронте окисления между слоями и высвобождая флюиды вдоль разломов. В результате образуются месторождения урана в песчаниках, для которых характерны большая протяжённость по горизонтали и относительно небольшая мощность по вертикали.

Количественно проанализировали характеристики развития разломов, магматическую активность, особенности распределения и характеристики точек пересечения с помощью таких методов, как основные ветви разломов, центральная симметрия, азимутальная аномалия и количество структурных пересечений. Наложив эти характерные переменные на известные рудные тела в области прогнозирования, получили данные о формировании руды.

На основе созданной трёхмерной модели разломов извлекли данные о линиях пересечения на разных уровнях высот, получив в общей сложности 34 карты распределения разломов в пределах прогнозируемого диапазона высот. Затем с помощью программного обеспечения для трёхмерного прогнозирования провели интерполяционный анализ данных о линиях разломов на 34 промежуточных плоскостях, а также количественный анализ и извлечение информации о линейных геологических характеристиках в пределах прогнозируемой области.

Хотя основным фактором, определяющим формирование рудных тел в районе является не тектонический, итоговый анализ показывает положительную корреляцию между азимутальной аномалией и буферной зоной структуры разлома Каласайи и формированием рудных тел.

Что касается азимутальной аномалии, то она отражает характеристики локальных структур, в частности распределение вторичных структур, в исследуемой области. Благоприятный интервал в районе месторождения Камсут составляет (0,8, 1) (рис. 6).

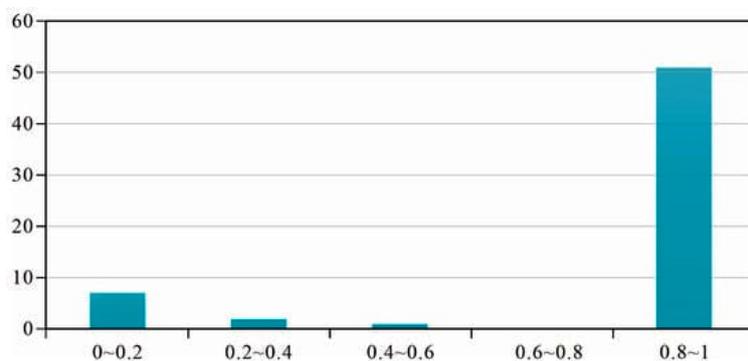


Рис. 6. Гистограмма аномалий ориентации известных рудных тел в районе Камсут.

Для буферных зон разломов была создана модель буферной зоны в радиусе 800 м вокруг разломов для изучения контролирующей руду природы крупных глубинных разломов. Затем буферные зоны глубинных разломов были наложены и проанализированы с помощью известной модели распределения рудных тел, результаты показаны на рисунке 7.

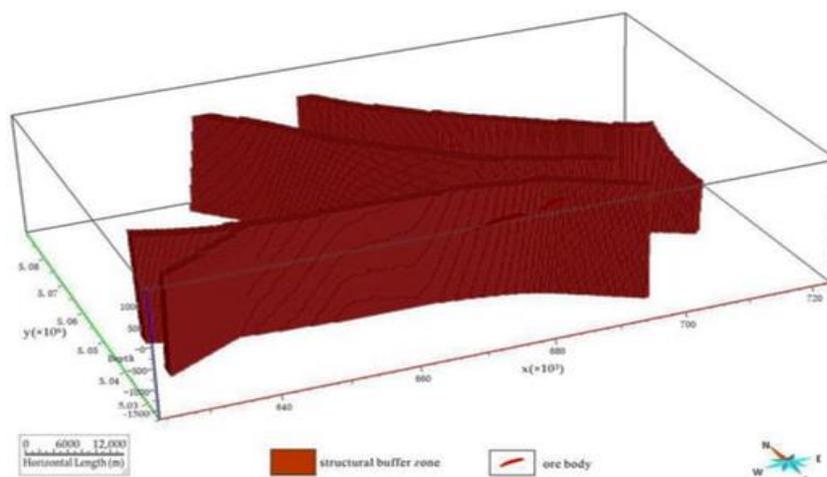


Рис. 7. Схематическое изображение блоков структурной буферной зоны и известных рудных тел.

Согласно статистическому анализу, основанному на теории и методах геостатистики, эффект наложения 800-метровой буферной зоны структурного разлома на известную модель рудного тела является средним. В пределах буферной зоны Камустского уранового месторождения находятся 18 кубических блоков, содержащих рудные тела.

Извлечение информации о зоне межпластового окисления.

Формация Тутунхе в районе месторождения Камсут характеризуется крупномасштабным процессом окисления, вызванным просачиванием воды между слоями, который происходил в слабо восстановительной геохимической среде. Вдоль края бассейна окисление преимущественно происходит в условиях, близких к фреатическим, с переходом к

межслоевому окислению по мере продвижения к центру бассейна. Зона межслоевого окисления обширна, отличается хорошей латеральной непрерывностью и стабильностью и охватывает различные сегменты, соединённые между собой. Длина этой зоны составляет примерно 8 км, а мощность варьируется от 30 до 70 м. Однако точная мощность зоны окисления остаётся неопределённой из-за ограничений, связанных с имеющимися буровыми данными.

Недавние исследования в районе Камуста выявили зоны межпластового окисления значительных масштабов как в среднеюрской формации Тутунхэ, так и в формации Сишаньяо. В формации Тутунхэ зоны окисления более обширные, а в формации Сишаньяо — относительно небольшие. Зоны окисления меньшей интенсивности также присутствуют в нижнеюрской формации Бадаован и формации Сангонгэ. Учитывая, что формирование межслойных зон окисления в значительной степени зависит от распределения песчаных тел, для построения модели межслойных зон окисления используется стратифицированная модель.

В этом исследовании информация о зонах окисления была получена путём оцифровки и пространственной реконструкции данных разведочных профилей с последующей классификацией информации. Определив границы этих зон, создали трёхмерную модель межпластовой зоны окисления для Камустского уранового месторождения. Эта модель служит ключевым элементом для количественного прогнозирования запасов руды. После создания модели зоны окисления Тутунхе и наложения на неё известных рудных тел для анализа было обнаружено 261 рудное тело, которые преимущественно расположены в зоне окисления.

Трёхмерная прогнозирующая количественная модель

В этом исследовании был проведен статистический анализ буферных зон, окружающих рудообразующие элементы, чтобы определить оптимальный диапазон влияния этих элементов на залежи урановой руды и тем самым выявить геологические аномалии, имеющие решающее значение для поисков.

Используя установленную блочную модель в пределах прогнозируемой области и дополнительно интегрируя геологические условия и рудообразующие геологические закономерности, характерные для исследуемой области, был проведен количественный анализ и извлечены благоприятные значения рудообразующей информации в рамках блочной модели. Этот анализ используется для расчёта трёхмерной прогнозной количественной модели для прогнозируемой области.

В районе Камуст влияние пластов и зон окисления на рудообразование особенно значительно. На основе информации о рудообразовании, такой как пласты, структуры, рудные тела и зоны окисления, была построена трёхмерная количественная прогнозная модель для района Камуст (табл. 1). Анализ и расчёты, проведённые на основе этой трёхмерной

прогностической количественной модели, позволили выбрать конкретные геологические пласты, а именно формацию Тутунхэ, формацию Сишаньяо и формацию Сангонгэ с буферной зоной мощностью 200 м, а также структурные буферные зоны (800 м), зоны окисления и диапазоны азимутальных аномалий (от 0,8 до 1) в качестве поисковых индикаторов. Результаты количественного анализа впоследствии были обработаны с помощью бинаризации для более чёткого определения перспективных объектов.

Метод 3D-функций доказательной веры

Метод функции правдоподобия, предложенный канадским математиком-геологом Ф. П. Агтербергом, представляет собой сложный метод геологической статистики. Этот метод использует теорему Байеса для проведения всестороннего статистического анализа наложенных друг на друга благоприятных рудообразующих элементов. Он оценивает вклад каждого элемента в образование руды и выявляет сочетание благоприятных факторов для прогнозирования перспективных районов. В этом исследовании атрибуты каждого фактора в кубической модели бинаризуются (принимают значение «ноль» или «единица») для анализа благоприятного диапазона для образования руды. После этого применяется метод трёхмерной функции правдоподобия для расчёта весовых коэффициентов каждого фактора достоверности в пределах месторождения.

Анализ результатов (табл. 3) показывает, что юрские пласты, песчаные тела формации Тутунхе и межслойные зоны окисления имеют высокие весовые значения, что указывает на сильную корреляцию с рудными телами и относительно слабую связь с характеристиками структуры разломов. На основе значений апостериорной вероятности прогнозируемых блоков территория добычи разделена на интервалы с разной степенью обогащения. Эти интервалы обозначены цветом для облегчения идентификации (рис. 8).

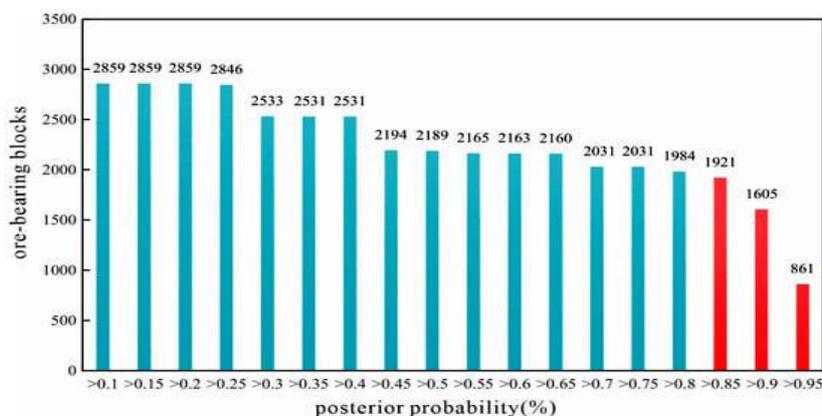


Рис. 8. Статистический график рудных тел, рассчитанный с помощью апостериорной вероятности.

На рисунке 8 показано, что 77,93% известных рудных тел расположены в пределах кубических блоков, где значения апостериорной вероятности составляют $\geq 0,85$.

Следовательно, участки с апостериорной вероятностью, превышающей 0,9, считаются перспективными для образования руды.

Табл. 3.

Веса переменных прогноза.

Evidence Items	W+	S (W+)	W–	S (W–)	C
F3	0.743396	0.223359	–0.02596	0.050252	0.769357
J ₂	0.608605	0.080842	–0.23497	0.06166	0.843575
J ₃	1.625091	0.04934	–4.19494	0.444995	5.820032
Interlayer Oxidation Zone	2.944135	0.061617	–0.97249	0.081099	3.916622
ZJ-J ₂	2.303345	0.049059	–8.92113	4.472136	11.22447
Isodensity	–0.2725	1.880797	0.000454	0.049043	–0.27295
Frequency	–0.0371	0.149256	0.004852	0.051906	–0.04195
Azimuthal Anomaly Degree	1.031453	0.137544	–0.0893	0.052474	1.120753

W+ and W– represent the weight values of the evidence factor in the areas where it exists and does not exist, respectively, while C denotes the correlation between the evidence factor and ore formation, which is obtained from a Student *t*-test.

Методы 3D информационной энтропии.

Трёхмерный информационно-количественный метод, предложенный Е.Б. Висоцким и Н.Н. Чайкиным, использует принципы и методы непараметрического одномерного геостатистического анализа для прогнозирования региональных ресурсов полезных ископаемых. Этот метод делает акцент на анализе пространственного распределения различных геологических элементов и рудообразующих единиц на территории исследования, оценивая влияние каждого рудообразующего элемента, включая геологические факторы, на прогнозирование ресурсов полезных ископаемых. Он включает в себя количественный анализ и статистическую оценку рудообразующих элементов в прогнозируемой области для расчёта информационной ценности этих элементов.

Статистический анализ рудообразующих элементов в районе Камуст (табл. 2) показывает, какой вклад вносит каждый элемент. На основе этих результатов с учётом геологического контекста и закономерностей рудообразования в исследуемом районе были определены области с высокой информативностью. Количество минерализованных единиц в этих интервалах затем было статистически объединено (рис. 9), а также составлена таблица распределения рудных тел с различными значениями информативности (табл. 4).

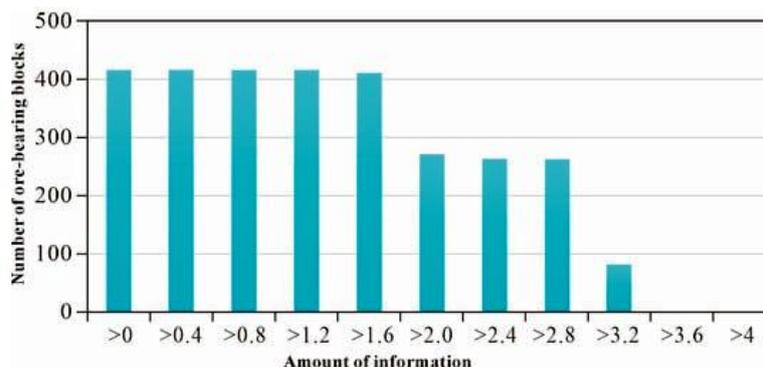


Рис. 9. Значения информационной энтропии известных рудных тел.

Распределение рудных тел в пределах различных значений информационной энтропии.

Amount of Information	Number of Ore-Bearing Blocks in Information Interval	The Ore-Bearing Proportion of Information Interval	The Difference of the Number of Ore Blocks in the Information Interval
>0	416	100.00%	0
>0.4	416	100.00%	0
>0.8	416	100.00%	0
>1.2	416	100.00%	5
>1.6	411	98.80%	140
>2	271	65.14%	7
>2.4	264	63.46%	0
>2.8	264	63.46%	182
>3.2	82	19.71%	82
>3.6	0	0.00%	0

Анализ расчётов и статистических данных по различным значениям количества информации помогает выявить тенденции и переломные моменты в изменениях пропорций рудных блоков и уровней минерализации. Значения количества информации варьируются от 1,6 до 2,8 и выше 2,80. Примечательно, что при значении количества информации 1,6 наблюдается заметное изменение пропорций рудных блоков, а при значении количества информации 2,8 пропорции блоков начинают стабилизироваться (рис. 10).

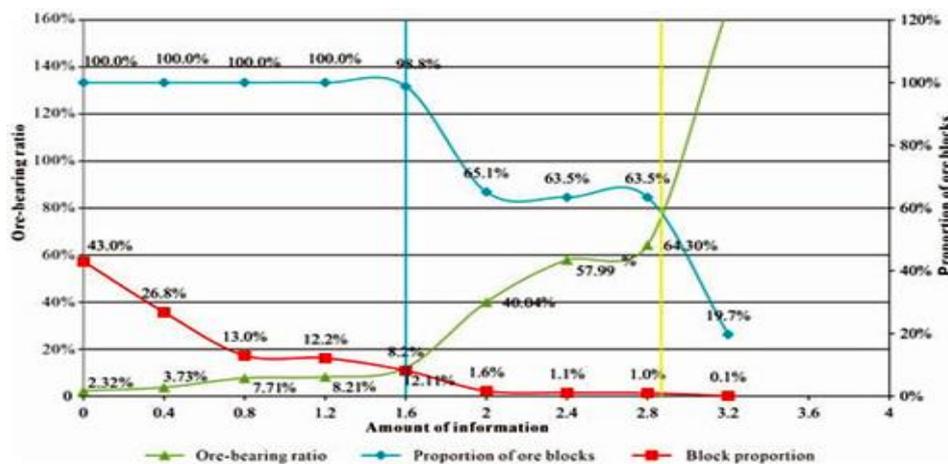


Рис. 10. Диаграмма статистического анализа информационной энтропии в исследуемой области.

В ходе исследования блоки с коэффициентом информативности выше 1,6 были определены как благоприятные для формирования руды (рис. 11а). Эти блоки преимущественно расположены в пределах межформационной буферной зоны формации Сишаняо и зоны окисления Тутунхэ на территории исследования. Учитывая широкое распространение благоприятных для формирования руды блоков, для определения перспективных участков требуется дополнительная обработка данных.

Для более эффективного выбора перспективных участков устанавливается порог в 2,8, при котором блоки с количеством информации выше 2,8 считаются наиболее благоприятными (рис. 11б).

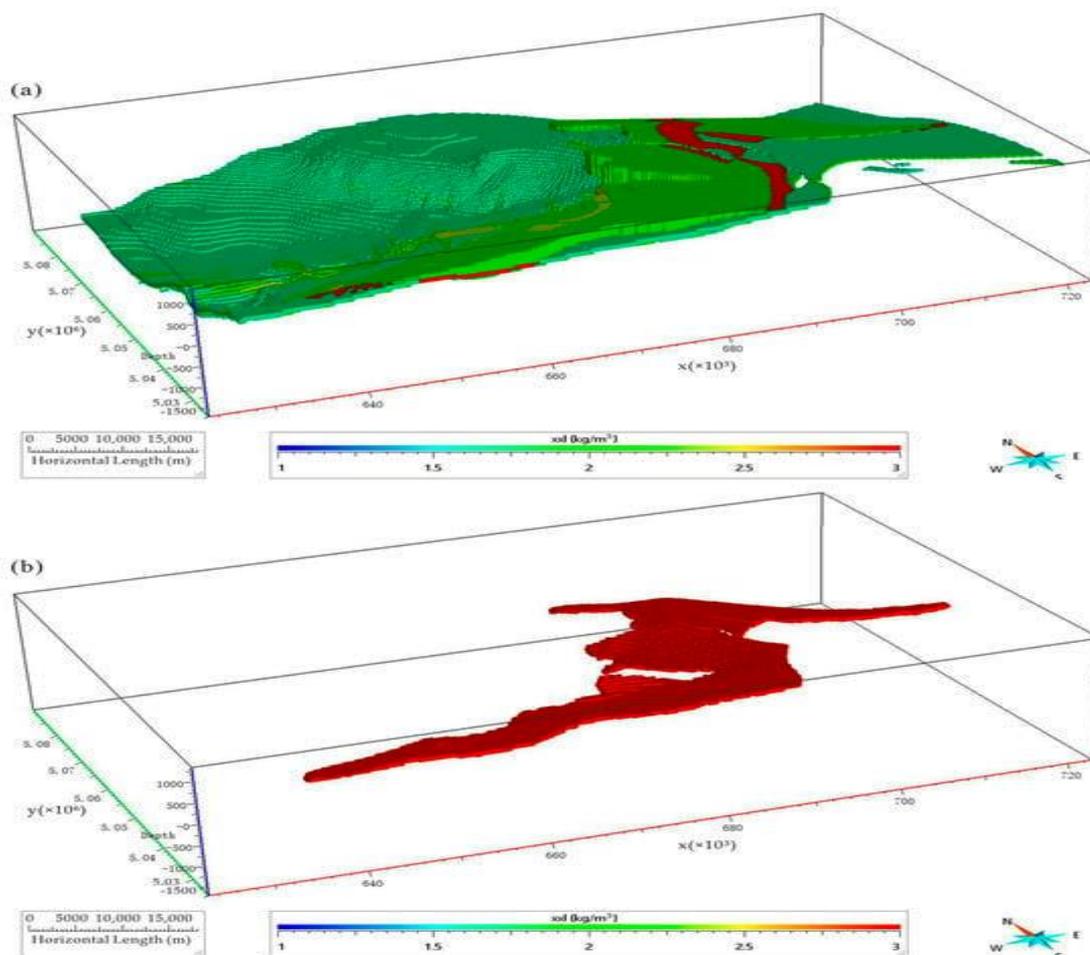


Рис.11. Распределение рудоносных блоков в районе Камуст. (а) с информационным содержанием $>1,6$.
(б) с информационным содержанием $>2,8$.

Определение перспективных участков.

Используя метод функции правдоподобия и метод информационной энтропии были рассчитаны значения апостериорной вероятности и количества информации. С помощью интервального статистического анализа и исключения областей, занятых известными рудными телами, анализ был интегрирован с региональными геологическими характеристиками и фундаментальными закономерностями рудообразования. Кроме того, было рассмотрено распределение этих закономерностей в трёхмерном пространстве. В результате была выделена перспективная область рудообразования (рис. 12). Этот район расположен в пределах моноклинали Каласайи и пространственно находится в пределах зоны окисления Тутунхе.

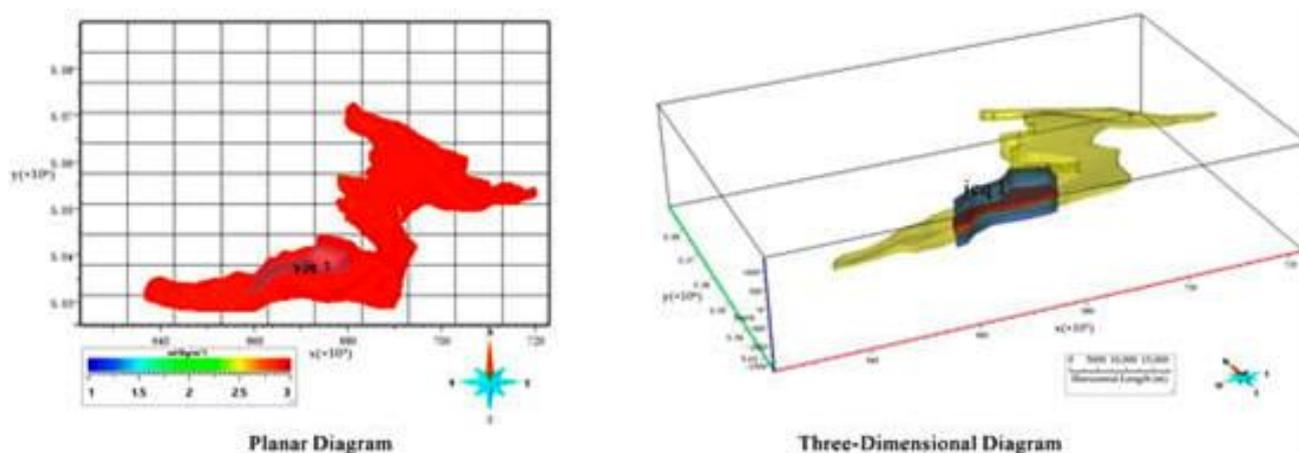


Рис. 12. Карта перспективной площади.

Результаты прогноза.

Трёхмерная структурная модель в сочетании с интегрированными электромагнитными характеристиками показывает, что формирование урановой руды в исследуемой области в основном определяется стратиграфической литологией, песчаными телами, структурными особенностями и межпластовыми зонами окисления. Угленосная обломочная осадочная формация, богатая органическими веществами, углеродистыми обломками и пиритом — веществами с восстановительными свойствами, — сформировавшаяся в тёплом и влажном климате, представляет собой идеальную среду для формирования урановых руд песчаникового типа. Переслаивающаяся литологическая структура “ил-песок-ил” формации Тоутунхэ играет важную роль в создании эффективных водоносных слоев над и под песчаными массивами, что благоприятно для рудообразования. Зона тектонического склона, сформированная моноклиналью Каласайи в результате тектонических движений, облегчает миграцию ураносодержащих, богатых кислородом вод из района источника вдоль песчаных массивов. Эти воды выпадают в осадок и концентрируются на фронте окисления, приводя к рудообразованию. Последующие тектонические поднятия в восточной части Джунгарской области обнажили юрские песчаные тела, сформировавшиеся на моноклинали Каласай, которые впоследствии были изменены более поздними ураноносными водами, богатыми кислородом, что способствовало развитию межпластовых зон окисления и урановой минерализации.

Кроме того, геофизические и геохимические данные показывают, что измеренное соотношение концентрации радона R в моноклинали Каласайи и на её восточной стороне превышает расчётную концентрацию радона, что указывает на наличие глубоко залегающих радиоактивных нуклидов. Это открытие также позволяет предположить, что данная территория является перспективной зоной для скрытой урановой минерализации, что согласуется с

результатами комплексного информационного прогнозирования. С помощью трёхмерного комплексного геологического моделирования в этом исследовании количественно определена перспективная рудообразующая зона к востоку от моноклинали Каласайи. Эта область обладает значительным потенциалом как объект поисков рудных тел на больших глубинах.

7. Выводы.

1. В этом исследовании представлен комплексный подход к прогнозированию глубоких залежей урановой руды, основанный на информации, особенно в районах с ограниченными геологическими данными. Объединив данные из нескольких источников, применив трёхмерное геологическое моделирование и передовые методы визуализации, были решены проблемы, связанные с неполнотой геологической информации в перспективных регионах.

2. Исследование было сосредоточено в рудном районе Камуст, был использован комплексный подход для определения типа, местоположения, глубины залегания и параметров оруденения. С помощью технологий трёхмерного геологического моделирования и визуализации была создана сложная база данных трёхмерной модели Камустского месторождения. Эта база данных объединяет различные элементы, такие как бурение, рудные тела, контролирующие структуры, зоны межпластового окисления и рудные тела. Это позволяет наглядно отобразить пространственное распределение благоприятных рудообразующих пластов, структур и других прогнозных элементов в пределах горнодобывающего района;

3. На основе трёхмерной геологической модели были обобщены и систематизированы региональные механизмы рудообразования, элементы, контролирующие руду, и поисковые признаки, чтобы создать прогностическую модель для поисков. Эта модель в сочетании с технологией обработки больших данных позволяет количественно анализировать и извлекать элементы, контролирующие руду, предоставляя обширную базу данных для трёхмерного количественного прогнозирования скрытого оруденения в районе Камуст.

4. В этом исследовании для проведения всестороннего информационного анализа и прогнозирования формирования скрытых рудных тел в районе Камуст применялся метод 3D-функции правдоподобия и метод 3D-информационной энтропии. С помощью этого подхода количественно определили перспективную ураноносную область, расположенную к востоку от моноклинали Каласайи

ИСТОЧНИКИ:

1. Fandong Meng, Xiaohui Li, Yuheng Chen, Rui Ye and Feng Yuan. «THREE-DIMENSIONAL MINERAL PROSPECTIVITY MODELING FOR DELINEATION OF DEEP-SEATED SKARN-TYPE MINERALIZATION IN XUANCHENG–MAGUSHAN AREA, CHINA». *Minerals* 2022, 12.
2. Hanliang Liu, Bimin Zhang, Xueqiu Wang, Zhixuan Han, Baoyun Zhang and Guoli Yuan. «APPLICATION OF THE FINE-GRAINED SOIL PROSPECTING METHOD IN TYPICAL COVERED TERRAINS OF NORTHERN CHINA». *Minerals* 2021, 11.
3. <https://www.cedar.com>
4. <https://www.mining.com/top-50-biggest-mining-companies>
5. Laura Tusa, Louis Andreani, Mahdi Khodadadzadeh, Cecilia Contreras, Paul Ivascanu, Richard Gloaguen and Jens Gutzmer. «MINERAL MAPPING AND VEIN DETECTION IN HYPERSPECTRAL DRILL-CORE SCANS: APPLICATION TO PORPHYRY-TYPE MINERALIZATION». *Minerals* 2019, 9.
6. Le Ouyang, Kaixuan Tan, Yongmei Li, Zhenzhong Liu, Hao Zhou, Chunguang Li, Yanshi Xie and Shili Han. «TRACE ELEMENT GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF PLANTS AND THEIR ROLE IN INDICATING CONCEALED ORE BODIES OUTSIDE THE SHIZHUYUAN W–SN POLYMETALLIC DEPOSIT, SOUTHERN HUNAN PROVINCE, CHINA». *Minerals* 2024, 14.
7. Pumulo Mukube, Murray Hitzman, Lerato Machogo-Phao and Stephen Syampungani. «GEOCHEMISTRY OF TERRESTRIAL PLANTS IN THE CENTRAL AFRICAN COPPERBELT: IMPLICATIONS FOR SEDIMENT HOSTED COPPER-COBALT EXPLORATION». *Minerals* 2024, 14.
8. Yingying Geng, Zhangyue Liu, Zhongbo He, Pengfei Zhu, Shaohua Huang and Huali Ji. «3D GEOLOGICAL MODELING AND METALLOGENIC PREDICTION OF KAMUST SANDSTONE-TYPE URANIUM DEPOSIT IN THE EASTERN JUNGGAR BASIN, NW CHINA». *Minerals* 2024, 14.
9. Zhenyu Zhang, Yongbo Li, Liang Chen, Qiang Zhang and Yue Sun. «DEEP GEOLOGICAL STRUCTURE ANALYSIS OF THE DONGYANG AREA, FUJIAN, CHINA: INSIGHTS FROM INTEGRATED GRAVITY AND MAGNETIC DATA». *Minerals* 2024, 14.