

## Обзор 2

**ГЕОЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ И ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВАЯ МОДЕЛЬ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЖЕЛЕЗО-ОКСИДНОГО (IOCG) ТИПА**

*РЕДАКТОР-СОСТАВИТЕЛЬ:  
В.В. Коротков*

## СОДЕРЖАНИЕ:

	стр.
1. Введение. ....	2
2. Геолого-генетическая модель.....	7
3. Минералого-геохимические индикаторы.....	18
4. Геофизические характеристики.....	46
5. Использование ДЗЗ при поисках IOCG месторождений.....	63
6. Прогнозирование IOCG потенциала на основе представлений о рудных системах ( <i>Австралия</i> ).....	74
7. Перспективы поисков IOCG месторождений ( <i>СВ России</i> ).....	117
<i>Источники</i> .....	123

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Железо-оксидно-золотомедные месторождения были признаны в качестве отдельного типа рудных месторождений после открытия в 1975 году медно-ураново-золоторудного месторождения Cu-U-Au Olympic Dam в Южной Австралии. С тех пор в мире было открыто множество месторождений типа IOCG, а в некоторых случаях ранее известные месторождения были переклассифицированы в тип IOCG. Железо-оксидно-золотомедные месторождения являются важнейшими источниками меди, золота и, в некоторых случаях, урана, что подтверждается открытием все того же супергигантского месторождения Olympic Dam в Южной Австралии, которое является одним из пяти крупнейших в мире источников содержания меди и крупнейшим источником добычи урана. Некоторые месторождения типа IOCG также содержат важные ресурсы Ag, Bi, Mo и критические металлы, такие как редкоземельные элементы (РЗЭ) и кобальт.

После более чем 40-летнего изучения месторождений IOCG в настоящее время по ним имеется солидная описательная база, но при этом остается много нерешенных вопросов, связанных с определением, классификацией, генезисом и поисковыми критериями этой все еще непонятной группы рудных месторождений. Многие из этих вопросов возникают из-за ограниченного понимания сходства и различия между различными типами железисто-окисных месторождений меди и золота, из которых только некоторые являются месторождениями типа.

Основные провинции (от самой древней до самой молодой, содержащие в строгом смысле месторождения IOCG: рудная провинция Carajás в Бразилии (поздний архей); медно-золотая провинция Olympic в кратоне Gawler, Южная Австралия (средний протерозой); IOCG-рудный район Cloncurry, ороген Mt Isa, штат Квинсленд (средний протерозой); и Андский складчатый пояс (мезозой). Кроме того, предполагается, что Au-Cu-Bi-рудный район Tennant Creek в северной Австралии (ранний протерозой) и провинция Kangdian на юго-западе Китая (ранний протерозой) также включают в себя месторождения типа IOCG. Многие другие провинции, в том числе: рудный район Kiruna, Швеция (ранний протерозой); магматическая зона Great Bear, Канада (ранний протерозой); рудная провинция Curnamona, южная Австралия (ранний-средний протерозой); рудный район Khetri, Индия (подний протерозой); и Луфилианская дуга на юге Африки (подний протерозой) содержат небольшие месторождения типа IOCG или их аналоги, а также изменения, связанные с оруденением типа IOCG. Вполне возможно, что некоторые из этих провинций могут стать крупными IOCG-провинциями по мере открытия новых месторождений.

Железо-оксидные месторождения (IOCG) представляют собой разнообразное семейство месторождений полезных ископаемых, характеризующихся следующими особенностями:

- Cu с или без Au как основные металлы,

- гидротермальные рудные типы и сильный структурный контроль,
- обилие магнетита и/или гематита,
- оксиды Fe с Fe/Ti выше, чем в большинстве магматических пород,
- отсутствие четких пространственных ассоциаций с магматическими интрузиями, как, например, в порфировом или скарновом типах месторождений,
- геологический возраст не имеет решающего значения (известны месторождения IOCG от архея до мезозоя).

Тем не менее, большинство месторождений IOCG демонстрируют широкую пространственно-временную связь с щелочными гранитоидными комплексами, обогащенными характерным, геохимически разнообразным набором элементов, включая различные комбинации U, PЗЭ, F, P, Mo, Ag, Ba, Co, Ni и As. Многие из этих элементов также являются экономически важными ПИ.

Богатые ураном месторождения IOCG, в которых U является экономически выгодным металлом, являются важной, но редкой подгруппой семейства IOCG. В настоящее время месторождение Олимпик Дам - единственное месторождение IOCG, на котором уран добывается как один из основных экономических товаров. Это месторождение является крупнейшим в мире ресурсом U. Большинство других месторождений IOCG, содержащих U, также выявлены в кратоне Гавлера на юге Австралии.

Гигантское месторождение Олимпик Дам в Австралии содержит 2000 Мт при 1,1% Cu, 0,5 г/т Au, 4000 г/т U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> и 0,24-0,45% La+Ce. За ним следует Ла Канделария в Чили (470 Мт при 0,95% Cu, 0,22 г/т Au и 3,1 г/т Ag) (рис. 1).

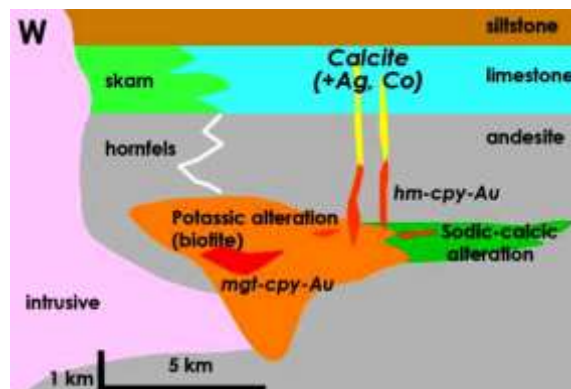


Рис. 1 Идеализированный профиль м-ния Ла Канделария (Чили).

Месторождения часто характеризуются более чем 20 модальным процентом оксидов железа и низким содержанием сульфидов. Рудные тела IOCG обычно связаны с крупными гранитными интрузиями мантийного типа, вмещают брекчии и расположены либо проксимальнее, либо дистальнее гранитных плутонов.

Месторождения IOCG, связанные со щелочными и известково-щелочными плутонами, также могут быть связаны с месторождениями Cu-Au-Mo порфирового типа,

месторождениями Cu-Ag «мантии», U, Au-PGE и полиметаллическими Pb-Zn-Ag ± Au. Жилами (рис. 2).

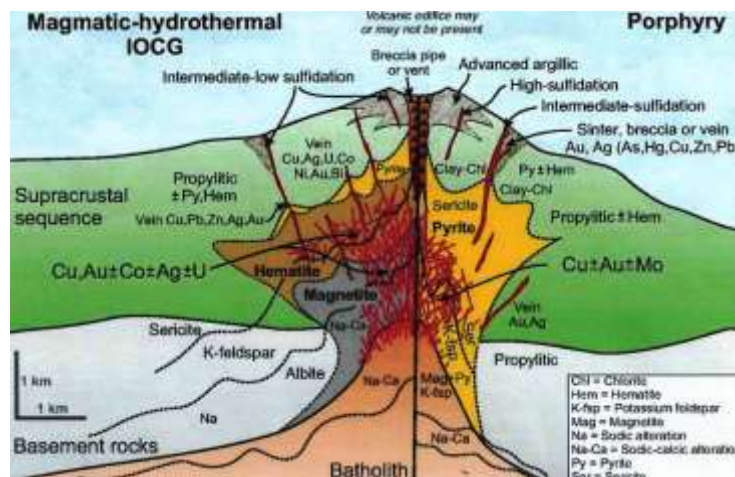


Рис. 2 Схема магматической системы с IOCG м-ниями.

Они определяются с помощью характеристик, которые отражают свойства перечисленных выше крупных промышленных IOCG-провинций. Ключевыми диагностическими параметрами месторождений и провинций типа IOCG являются:

- Повышенные концентрации Cu и Au (при этом они могут и не быть промышленными) с аномальными содержаниями легких редкоземельных элементов, U, Ag, Ba, F, а в некоторых провинциях/месторождениях - повышенные концентрации Mo, Bi, As, Se; низкие содержания Zn, Pb, W, Sn, хотя удаленные или более глубокие зоны могут быть локально обогащены этими элементами; некоторые зоны в пределах IOCG-месторождений и/или провинций, богатые оксидом железа, могут быть не сильно обогащены Cu и Au.

- Меденосные сульфиды и золото пространственно связаны с магнетитом и/или гематитом с низким содержанием титана, которые в изобилии (> 10 об. %) присутствуют в месторождениях или в рудных телах; сульфиды меди образуются синхронно с оксидами железа и/или после них; пирит и/или пирротин обычно присутствуют в небольших количествах или могут отсутствовать; в некоторых рудных системах наблюдается зональность Cu-Fe сульфидов от борнит-халькоцита во внутренних и верхних частях систем до халькопирит-пирита в удаленных частях и на глубине.

- Гидротермальный кварц содержится в меньших количествах по сравнению с оксидами железа, хотя в некоторых верхних зонах отдельных IOCG систем его может быть достаточно много.

- Широко распространены гидротермальные изменения, характеризующиеся определенной зональностью в объемах от 10 до 100 км<sup>3</sup>. Na±Ca изменения (альбит, амфибол, клинопироксен) практически совпадают с Cu-Au оруденением и обычно проявляются в рудных IOCG системах на многокилометровых глубинах; эпидот и гранат встречаются редко и в основном ограничены локальными зонами развития скарнов.

•Ближние зоны гидротермальных изменений на средних глубинах (уровнях) систем обогащены двухвалентным железом и калием, глубже наблюдаются изменения, представленные магнетит-биотитом ( $\pm$  альбитом), а ближе к поверхности - магнетит-калишпатовые подзоны. Могут присутствовать железосодержащие карбонаты; в некоторых системах встречаются небольшие количества апатита с магнетитом.

•На самых верхних (от приповерхностных до эпитермальных) уровнях гидротермальных систем преобладают минералы трехвалентного железа (гематит) и гидролитические (серицит, хлорит)  $\pm$  карбонатные изменения.

•Месторождения эпигенетические, синтетектонические, связаны с хрупко-пластичными и хрупкими деформациями в средней и верхней частях коры и представлены гидротермальными брекчиями, вкрапленным или массивным сульфидным замещением и жильными штокверками.

•Месторождения удалены от широко распространенных одновозрастных интрузий кислого и основного состава. Обычно присутствуют бимодальные (базальт-риолитовые) вулканические породы; кислые магматические породы типа «А» или высокотемпературного типа «I». Магматические породы основного состава могут быть обогащены калием.

•Вмещающие породы очень разнообразны, начиная от гранитов и кислых вулканических пород до основных магматических и метаосадочных пород. Породы, обогащенные графитом/углеродистым веществом, редко являются вмещающими для месторождений IOCG, но могут содержать богатую сульфидом железа минерализацию в тех же металлогенических провинциях. Карбонатные породы встречаются реже, чем полевошпатовые.

•На месторождениях типа IOCG отмечается наличие двух типов газово-жидких включений (ГЖВ): высокотемпературные ( $> 300$  °C) рассолы и низкотемпературные водные флюиды; также обычно присутствует  $\text{CO}_2$ , что свидетельствует о фазовом разделении на насыщенные  $\text{CO}_2$  и водные флюиды.

Эти характеристики отличают месторождения типа IOCG от месторождений железоксидно-апатитового (IOA) типа Kiruna, от обогащенных магнетитом (золото)-медно-порфировых месторождений, от обогащенных окислами железа скарновых медно-золотых, месторождений, от приуроченных к осадочным породам стратифицированных и стратиформных Cu (Co-Ag) и плащеобразных Cu (Ag) месторождений, от орогенных и интрузивных месторождений золота, а также от обогащенных магнетитом зон питания вулканических массивных сульфидных месторождений (VMS) с богатыми содержаниями меди и золота. Однако в некоторых IOCG провинциях встречаются представители этих (других) типов месторождений, причем некоторые из них имеют отдельные свойства, характерные для месторождений типа IOCG. Например, для районов с месторождениями IOA типичны региональные Na-Ca изменения, а в медно-золото-порфировых месторождениях

распространены калиевые изменения. Кажущееся совпадение и наложение характеристик является предметом постоянных споров.

## 2. ГЕОЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Три основные геотектонические среды благоприятны для размещения этого типа месторождений: внутриконтинентальный орогенный коллапс, внутриконтинентальный анорогенный магматизм и растяжение вдоль континентальной окраины, связанной с субдукцией (рис. 3).

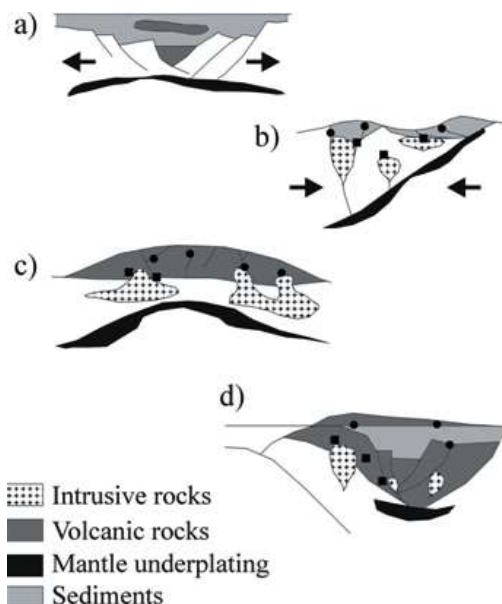


Рис. 3. Обобщенная геотектоническая обстановка для формирования железно-оксидных (ИОСГ) и магнетит-апатитовых (ИОА) месторождений: а) расширение, бассейновое образование; б) сжатие, обрушение бассейна и магматизм. в) анорогенный магматизм. г) континентальная окраина, связанная с субдукцией. Черные точки для ИОСГ и квадраты для ИОА месторождений.

Все эти среды характеризуются огромной магматической активностью, высоким тепловым потоком и относительно окисленными материнскими породами.

Рудные системы могут быть временно и пространственно связаны с магматическими событиями. Однако ИОСГ месторождения могут не иметь прямого отношения к интрузиям на структурном уровне. Часто районы, содержащие ИОСГ оруденение, связаны с морскими или озерными эвапоритами и локализуются обычно вдоль крупных разломов земной коры. Как правило, оруденение связано с зонами брекчий разнообразной морфологии (от слоистых до неправильных и штокверковых форм).

Минералы оксида железа обычно многочисленны, а сульфиды железа почти отсутствуют. Отмечено значительное содержание Ва, Р, F или карбонатов. ИОСГ оруденение может содержать U, Ag, Mo, Co, As и Zn. Почти все эти месторождения содержат высокие концентрации РЗЭ.

Вмещающие породы сильно изменены. Изменения также связаны с химическим составом исходной вмещающей породы. ИОА, как и ИОСГ оруденение пространственно связано с натриевыми/натриево-кальциевыми изменениями, которые могут переходить в гематит-калиевые или гидротермические изменения.

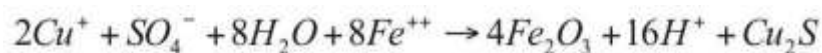
Рудные флюиды, ответственные за IOA месторождения, должны были быть водными флюидами с температурами выше 250°C, солеными, окисленными и бедными сульфидами. Флюиды, участвующие в образовании IOCG оруденения, по-видимому, представляют собой ретроградную реакцию флюидов, которая вызвала отложение магнетита и смешивание флюидов с солевыми, окисленными, богатыми сульфидами низкотемпературными флюидами, содержащими CO<sub>2</sub>. Характеристика флюидов, участвующих в процессах минерализации, чрезвычайно важна для понимания происхождения залежей IOCG. Более того, эти же флюиды также ответственны за изменение вмещающих пород, что может быть признаком нацеливания на перспективные области в региональном масштабе.

Предложены три модели относительно влияния характера флюида на IOCG оруденение. Первая модель предполагает охлаждение флюида, аналогичное тому, что вызывает осаждение IOA минерализации и натриево-кальциевые изменения. Вторая предполагает химическое взаимодействие между флюидом, вызывающим IOA минерализацию с более холодным, обогащенным Cu-Au, сульфат-флюидом метеорного/поверхностного происхождения. Третья модель рассматривает участие окисленной, соленой, холодной и богатой сульфатами жидкости.

Эти флюиды могут быть получены из больших объемов окисленных горных пород, которые также должны содержать относительно высокое содержание меди (то есть субэральных основных вулканитов). Основные интрузивные системы могут быть способны обеспечить энергией, необходимой для создания требуемых гидротермальных систем, которые также ответственны за изменения в региональном масштабе.

*Предлагается несколько простых описаний химического процесса:*

Когда происходит перемешивание флюидов, в случае IOCG оруденения, происходит осаждение сульфидов меди, что может быть представлено простой химической реакцией:



Согласно этой реакции окисление Fe<sup>++</sup> и восстановление SO<sup>4-</sup> происходят одновременно. Это приводит к образованию Fe<sup>+++</sup>, которое выпадает в осадок в виде оксида железа. Избыток ионного водорода, образующегося в реакции, можно нейтрализовать гидролизом полевого шпата. Отсюда следует, что сульфиды меди могут выпадать в осадок в результате смешения флюидов и/или химических взаимодействий флюид-порода с участием минералов, содержащих железо. Эти минералы будут заменены гематит-магнетитом с одновременным осаждением сульфидов меди. Другим важным следствием является то, что месторождения IOCG должны располагаться в породах, богатых полевыми шпатами, которые могут быть разрушены путем собственного гидролиза во время осаждения руды.

Наличие региональных натриевых/кальциевых изменений, связанных с IOCG оруденением, требует относительной близости поверхностных или приповерхностных



соленых вод. Предлагается модель для объяснения этих изменений, связанных с IOCG оруденением (рис. 4).

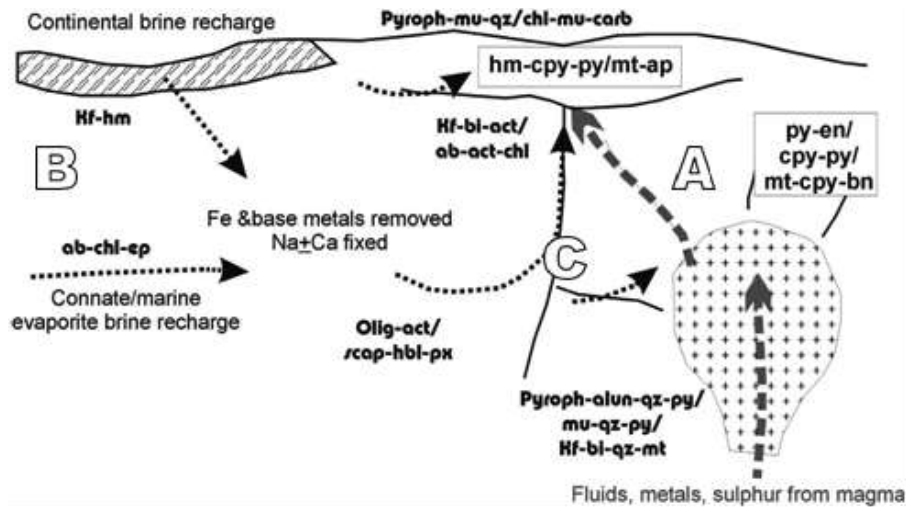


Рис. 4. Модель гидротермальных изменений и оруденения в присутствии внешних немагматических флюидов.

Для чисто магматической системы (А) флюиды, образовавшиеся во время охлаждения интрузивного тела, текут наружу. Они генерируют К-силикатные изменения по глубине и кислотные изменения на мелководье. В этом случае месторождения характеризуются наличием халькопирита, борнита и магнетита. Более позднее оруденение может включать пирит, халькопирит, ковеллит и другие высокосульфидированные минералы меди. Приток внешних рассолов может вызвать натриевые изменения, которые также могут быть произведены щелочными или богатыми фтором флюидами магматического происхождения. В дистальных точках поток внешних рассолов вызывает общее истощение металлов, с которым связаны Na-Ca- (К) -гематитные изменения (В). Ближе к магматическому центру внешние флюиды сосредоточены вдоль проницаемых зон. Здесь во время охлаждения флюиды вызывают натриевые и/или калиевые изменения в основных и кислых вмещающих породах соответственно. Также важно, что вблизи магматического центра внешние рассолы могут откладывать металлы, выщелоченные дистально (например, минералы с низким содержанием серы, такие как магнетит, гематит+халькопирит). Если магматические флюиды текут внутрь (С), может произойти обогащение серой и металлами.

Эта модель также объясняет пространственные отношения между месторождениями IOA и IOCG. В то же время модель усиливает идею генетической связи между IOCG и порфировыми месторождениями. Порфировые системы могут содержать натриевые, кальциево-натриевые и калиевые изменения, которые имитируют изменения IOA и IOCG месторождений.

#### **Обобщенная модель IOCG рудных систем Австралии [4, 12].**

Важным индикатором источника энергии в системах IOCG являются магматические ассоциации, их геотектонический контекст схематично показан на рисунке 5.

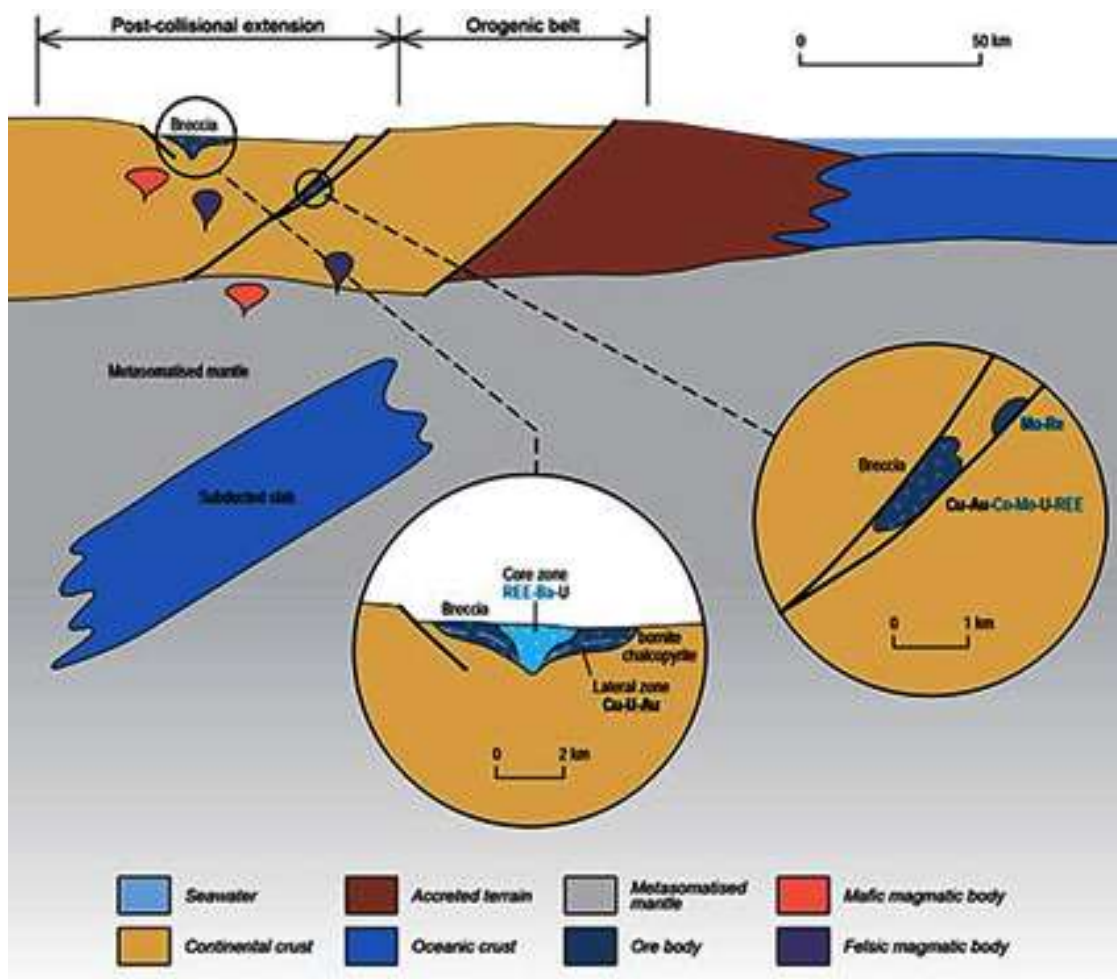


Рис. 5 Схематическое изображение рудной системы IOCG и других типов месторождений.

Ранние геодинамические процессы, связанные с субдукцией (возможно, около 1850 млн лет назад), привели к метасоматозу верхней мантии. Расплавы, происходящие из этой обогащенной мантии, возможно вызванные мантийным плюмом, привели к обширному плавлению земной коры и образованию высокотемпературных магм типа А, связанных с основными расплавами богатыми калием в период от ~ 1595 млн лет до ~1575 млн лет назад.

#### *Источники жидкостей, металлов и энергии.*

Палеогеотермические градиенты от высоких до экстремальных считаются ключевым фактором (источником энергии) потока флюидов в верхней коре регионального масштаба в основных системах IOCG. Для объяснения огромного масштаба систем гидротермальных изменений и массы гидротермально измененных пород (более 1 млн. тонн руды, богатой гидротермальными оксидами, сульфидами и силикатами железа) необходимы региональные (гидро) термические системы в масштабе земной коры. Основные магматические породы могут отмечать очаги тепловых аномалий корового масштаба, а также служить источником рудных металлов и/или серы. Высокотемпературные коровые (кислые) расплавы типа А, расположенные на высоких уровнях в коре, увеличили тепловой поток, обеспечиваемый мантийным магматизмом.

Отличительной особенностью месторождений IOCG является присутствие двух различных флюидов во время формирования оруденения: (1) сильно окисленный флюид (например, метеорные/грунтовые воды) и (2) высокотемпературные рассолы глубоких источников (магма-гидротермальные флюиды и/или флюиды, вступившие в реакцию с метаморфическими породами). Во многих системах IOCG также есть свидетельства наличия летучих флюидов во время образования руды (содержащих  $\text{CO}_2$ ). Источниками Cu, Au, S, Cl и  $\text{CO}_2$  могут быть либо одновозрастные магмы (кислые и/или основные), либо осадочные и магматические породы, выщелоченные рудными флюидами, что отмечено в зонах региональных Na-Ca изменений. Уран и РЗЭ, скорее всего, были выщелочены из гранитоидных или кислых вулканических пород. В качестве альтернативы в системах IOCG возможны прямые магмато-гидротермальные источники U и REE. В настоящее время нет достаточных данных, чтобы провести различие между этими возможными сценариями для источников U и REE.

Бассейны, в которых происходило формирование IOCG, как правило, сохранены и обычно демонстрируют свидетельства (бывшего) присутствия эвапоритовых минералов. Системы рифтовых бассейнов могут поставлять часть Fe, Cl и S в системы IOCG, особенно те, которые имеют общий окисленный характер с субэвральными и мелководными морскими условиями осадконакопления. К ним относятся континентальные задуговые бассейны и прогибы. Низкая степень метаморфизма этих бассейнов до образования IOCG является благоприятной из-за потенциально более высокой проницаемости и содержания флюида, чем бассейны, метаморфизованные до среднего или высокого состояния. В моделях, включающих немагматические флюиды, обнажение вблизи/на палеоповерхности материнских пород, богатых ураном и РЗЭ, благоприятно для источников сильно окисленных поверхностных вод, способных переносить уран и РЗЭ. Геоморфологические депрессии (например, кальдеры, грабены, мааровые комплексы и т.д.) способствуют смешиванию флюидов коры и глубинных источников.

### ***Пути переноса.***

Пограничные зоны террейнов, возникшие во время более раннего формирования орогенных поясов, как полагают, являются путями переноса флюидов для основных систем IOCG. Такие структуры были задокументированы под месторождением Олимпик Дам в кратоне Голера. Эта концепция распространена и на другие крупные месторождения IOCG во всем мире. Основные системы IOCG могут преимущественно располагаться в висячих стенках граничных зон между блоками земной коры, над зонами частичного плавления земной коры и мантии. Поток флюидов усиливается за счет сложения с более ранними процессами в этой высокотемпературной области плавления. Существующие ранее бассейновые структуры и поперечные структуры второго порядка (например, наборы

сопряженных разломов) локализуют брекчирование (на высоких уровнях земной коры) и поток флюидов. Пересечения разломов второго порядка с границами террейнов в масштабе земной коры являются предпочтительными местами для систем IOCG.

Зоны гидротермальных изменений отмечают пути движения флюидов. В системах IOCG региональные зоны Na-Ca изменений могут представлять собой пути потока жидкости в более глубоких и/или более удаленных частях системы, где были выщелочены некоторые компоненты руды. С другой стороны, зоны магнетит-биотитовых, магнетит-калиевых полевых шпатов и богатые гематитом зоны изменений представляют собой более проксимальные параметры IOCG и, таким образом, не только отмечают пути потоков флюидов, но также представляют собой участки физико-химических градиентов в зонах рудоотложения.

### *Процессы осаждения.*

Хотя широко известно, что два типа флюидов участвовали в образовании большинства, если не всех основных месторождений IOCG, остается неясным, какой из них несет основную массу меди, золота, урана, РЗЭ и других металлов. В районе Олимпик Дам высокотемпературные рассолы содержали не менее 300 ppm Cu. Подобные гиперсоленые рассолы в других провинциях IOCG во всем мире также содержат повышенные уровни Cu и других металлов (например, провинция Карахас, Бразилия). Для систем IOCG восточной части кратона Гавлер ключевым процессом осаждения Cu-Au-U, по-видимому, является смешивание больших объемов окисленных подземных вод (или мелководных бассейновых вод) с обогащенными железом рассолами среднего окислительно-восстановительного состояния из глубоких источников. Этот процесс приводит к уменьшению и охлаждению окисленных жидкостей, а также к возможным изменениям pH и активности лиганда обеих жидкостей, вызывая осаждение металлов. Кроме того, реакция окисленных флюидов с породами, богатыми  $Fe^{2+}$ , таких минералов как магнетит, сидерит и хлорит, или с восстановленной серой в сульфидных минералах, или с восстановленным углеродом, также могла привести к отложению Cu-Au-U. Химическое моделирование показало, что более высокое содержание меди и золота ожидается в зонах, где гематит заменил более ранний магнетит.

Смысл этих результатов заключается в том, что богатые гематитом зоны гидротермальных изменений в системах IOCG более благоприятны для минерализации Cu-Au-U с более высоким содержанием меди по сравнению с зонами, богатыми магнетитом. Гематит может располагаться над магнетитом (например, Олимпик Дам) или сбоку от магнетита (например, м-ние Prominent Hill). Минерализация U может происходить в перекрывающих и/или самостоятельных зонах относительно Cu-Au минерализации. Присутствие РЗЭ в системах IOCG менее ясно, но на месторождении Олимпик Дам безрудное ядро гематита значительно

обогащено легкими РЗЭ. Повышенные концентрации легких РЗЭ встречаются также во всех зонах Cu-Au минерализации.

#### ***Металлогенический комплекс.***

Рудный комплекс месторождений IOCG характеризуется разнообразным составом и содержит повышенные концентрации многих важнейших металлов. На месторождении Олимпик Дам установлено наличие чрезвычайно широкого комплекса минералов и соответствующих геохимических изменений. Выявлено более 90 минералов, и в дополнение к Cu, U, Au и легким РЗЭ месторождение обогащено As, Ba, Bi, C, Cd, Co, Cr, F, Fe, In, Mo, Nb, Ni, P, Pb, S, Sb, Se, Sn, Sr, Te, V, W, Y и Zn.

Изменения, минерализация и комплекс элементов зонируются в пределах месторождения Олимпик Дам, формируя зоны от периферии внутрь и вверх от глубины к центру месторождения следующим образом:

(1) изменение восстановленного оксида железа (магнетит-апатит-сидерит-хлорит-кварц)→изменение оксида железа (гематит-серицит-флюорит)→гематит-кварц-баритовые изменения,

(2) сидерит→флюорит→барит,

(3) сфалерит→галенит→пирит→халькопирит→борнит→халькоцит→несульфидные,

(4) дистальные или парагенетически ранние (?) бедные цветными металлами (Mo-W-Sn-As-Sb)→богатые цветными металлами (Cu-Pb-Zn) минералы→бессульфидная гематит-кварц-баритовая брекчия в центре месторождения.

Некоторые другие месторождения IOCG региона высоко обогащены комбинациями Ba, Co, Ni, As, Mo, Re и других элементов. Так например, месторождение Мерлин представляет собой богатый ресурс Mo-Re (6,7 млн т при 1,4% Mo и 23 ppm Re) с незначительной Cu-Au минерализацией и незначительными оксидами железа.

#### **Краткие примеры IOCG месторождений.**

##### ***Месторождения IOCG в Канаде***

Как и в случае с мировыми аналогами, месторождения IOCG в Канаде группируются в минеральные районы, которые образуют целые пояса. Стили минерализации наиболее разнообразны в районах Порт Радий-Эхо-Бэй на северной оконечности Магматической зоны Большого Медведя (Au-Co-Bi-NI) и Cu-Au-Ag (Sue Dianne). Между этими районами расположены крупные малоизученные гидротермальные системы. Обширные территории гидротермально-метасоматических изменений и брекчий обеспечивают основу для региональных исследований и картирования. Контроль над разломами земной коры при развитии систем IOCG является обычным явлением и представлен, среди прочего, фанерозойской зоной разлома Кобеквид-Чедабукто в Аппалачском орогене.

Многоступенчатое развитие IOCG во время орогенных процессов хорошо иллюстрирует мезопротерозойский район озера Маниту в провинции Гренвилл, в то время как архейский зеленокаменный пояс Шебандован демонстрирует, что некоторые из традиционных районов Канады VMS и Au горнодобывающих районов обладают потенциалом для архейских и палеопротерозойских отложений IOCG. Наконец, обнажения брекчий Вернеке на Юконе - лучший вклад Канады в тематические примеры IOCG характеристик без выхода на поверхность одновозрастных магматических тел. В совокупности канадские районы IOCG с их интенсивными гидротермальными системами регионального масштаба и большим разнообразием типов месторождений побуждают геологов разрабатывать комплексные модели месторождений IOCG, которые обеспечивают эффективные методы поисков и разведки.

*Месторождение Мон-де-л'Эгль (Канада) [11, 12]* расположено в северной части купола Лемье (Квебек) - субциркулярной антиформы силурийско-девонских осадочных пород, прорезанной многочисленными основными и кислыми силлами и дайками. Плутонизм возник в континентальной обстановке внутриплитного рифтинга. Типичная для орогенного коллапса Cu-Fe( $\pm$ Au) минерализация размещена в жилах, штокверках и брекчиях. Парагенетическая последовательность включает:

- (1) интенсивные натриевые, калиевые, хлоритовые и кремневые гидротермально-метасоматические изменения пород;
- (2) жилы гематита, кварца, пирита, магнетита и халькопирита, штокверки и брекчии;
- (3) пострудные доломит-гематитовые жилы и прожилки.

Магматические породы характеризуются натриевыми и калиевыми изменениями, тогда как для осадочных пород характерна декальцификация, окварцевание и калиевые изменения. Как интрузивные, так и осадочные породы затронуты интенсивными хлоритовыми ( $\pm$  кремнистыми) изменениями. Изотопный состав серы пирита и халькопирита ( $\delta^{34}\text{S}$  = от -1,5 до 4,8‰) предполагает, что сера была получена в основном из магматических пород. Изотоп  $\delta^{18}\text{O}$  (от -0,4 до 2,65 ‰) указывает на присутствие метеорной или морской воды, которая прореагировала с вмещающими породами. Смешивание горячего магматического флюида с более холодными флюидами предлагаются в качестве основной модели формирования оруденения и изменений. Оруденение, изменения и изотопный состав серы месторождения Мон-де-л'Эгль сопоставимы с другими месторождениями IOCG по всему миру, что делает его примером палеозойской минерализации IOCG, сформировавшейся на небольшой глубине в пределах толщи осадочных пород.

#### ***Новые системы IOCG в Бразилии [14].***

Медные районы Вале-ду-Кюраса и Риачу-ду-Понтал расположены в северной части архейского кратона Сан-Франциско и представляют собой два импульса минерализации.

Медные районы были определены как месторождения железо-оксидно-медно-золотого (IOCG) класса. Более древнее металлогеническое событие, связанное с месторождением меди Карамба, расположенным в районе Вале-ду-Кюраса, связано с палеопротерозойскими (примерно от 2 до 2,2 млрд лет назад) гидротермальными процессами. Эпизод вулканизма и связанного с ним плутонизма более молодой неопротерозойский (ок. 750–570 млн лет назад) представлен минеральным районом Риачу-ду-Понтал. Данные сейсмической томографии по всей восточно-центральной части Бразилии показывают, что многоуровневая провинция Каражас и медные районы Вале-ду-Кюраса и Риачу-ду-Понтал расположены по обе стороны от заметной высокоскоростной зоны верхней литосферы, имеющей северо-западный простирание. Края высокоскоростной зоны указывают на долгоживущие субпараллельные трансформные структуры, которые были фокусом множественных реактиваций и событий медной минерализации. Региональные гравиметрические и магнитные карты показывают, что медный район Вале-ду-Кюраса простирается на площади 110x22 км. Значения магнитного поля и силы тяжести показывают значительные вариации, связанные с этой областью. Район включает в себя высокие значения гравитации, связанные с медным рудником Карамба ( $> 35$  мГал), который имеет большую плотность ( $3,13 \text{ г/см}^3$ ), чем плотность неминерализованной вмещающей породы ( $2,98 \text{ г/см}^3$ ). Сигнатура гравитационной аномалии над медным районом Риачу-ду-Понтал характеризуется 40-километровым простиранием с северо-запада на юго-восток с отклонением от нормы Буге. Месторождения Ria4 медного района Риачу-ду-Понтал расположены в этих региональных областях с низкой гравитацией. Данные региональных аэромагнитных и наземных гравиметрических исследований были инвертированы для получения трехмерной модели магнитной восприимчивости и плотности, соответственно, для известных районов. Результаты показывают, что месторождение Карамба характеризуется как плотным, так и магнитным источником, демонстрирующим структурный контроль зонами сдвига. Геологические модели 2D и 3D показывают две основные перспективные тенденции в северо-северо-западном направлении. Тренды I и II имеют форму сигмоидального сдвига и расположены в зоне контакта между доменами с высокой магнитной восприимчивостью ( $SI > 0,005$ ) и плотностью  $> 0 \text{ г/см}^3$ ). Тенденция I имеет размеры  $40 \times 10$  км и включает медные рудники Карамба, Сурубим и Вермельо и другие небольшие месторождения. Результаты, полученные с помощью трехмерной модели магнитной инверсии для региона Риачу-ду-Понтал, показывают слабые максимумы магнитных аномалий, простирающиеся вдоль тренда магнитного градиента СЗ – ЮВ. Градиент связан с нанесенными на карту зонами сдвига, которые перекрывают более старые и более глубокие особенности северо-восточного и юго-западного корня кратона Сан-Франциско. Область включает высокие значения силы тяжести, связанные с месторождением меди Карамба, которое имеет большую плотность ( $3,13 \text{ г/см}^3$ ), чем плотность неминерализованной вмещающей породы ( $2,4 \text{ г/см}^3$ ).

### *Месторождение Мантоверде (Чили)[14]*

Рудный район Мантоверде расположен на севере Чили в чилийском железном поясе, формирование которого связано с зоной субдукции, образованием задугового бассейна и юрско-раннемеловым магматизмом, который развивался на позднепалеозойском и триасовом фундаменте (рис. 6).

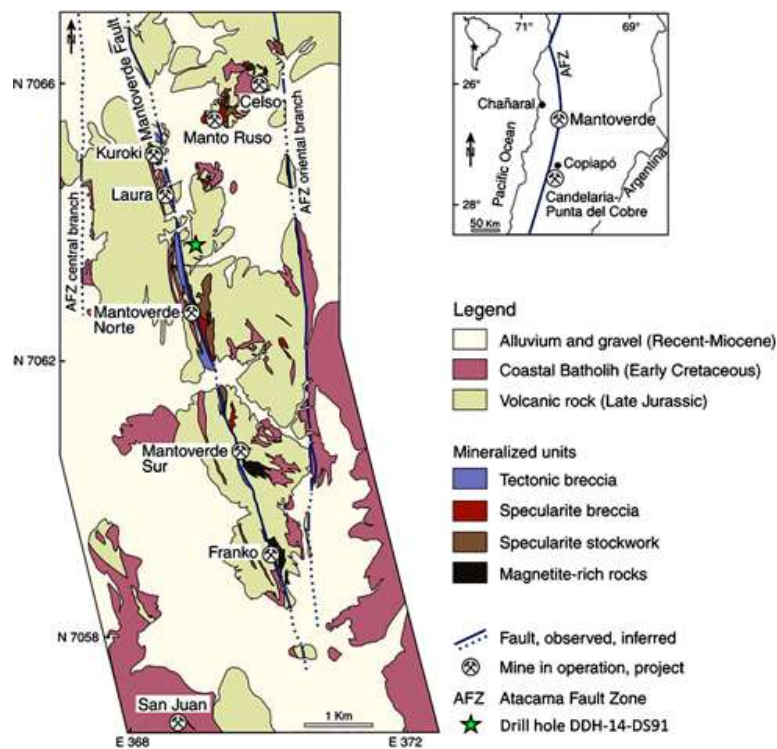


Рис. 6 Карта района Мантоверде.

Месторождение Мантоверде содержит сотни миллионов тонн добываемой руды железа и сульфида меди и относится к магмато-гидротермальному типу. Ее генетическая модель определяется изотопными данными Fe и O для магнетита и гематита в сочетании с данными по изотопному составу C, O, S, Sr, Pb, Ar, Kr и Xe. Магнетитовые ядра месторождения по сравнению с периферийными зонами обогащены Ti, V, Mn, Si, Al, Mg и Ca, что указывает на то, что магнетит образован из первоначально более горячего и постепенно остывающего исходного флюида. Значения  $\delta^{18}\text{O}$  изотопа варьируются в зависимости от отдельных образцов магнетита и гематита из-за разной степени гидротермальных изменений, что подтверждается широко варьирующимися концентрациями Al, Ca, Mn, Ti и V в магнетите и гематите, в то время как значения  $\delta^{56}\text{Fe}$  изотопа остаются относительно незатронутыми гидротермальными изменениями и, в сочетании с изотопами O, являются надежным инструментом для различения источников магматических и метеоритных флюидов.

### *Месторождение Гуэльб Могрейн (Мавритания) [7]*

В Мавритании находится одно значительное месторождение меди и золота Гуэльб Могрейн и несколько мелких месторождений, которые были отнесены к категории месторождений ИОСГ. Месторождение архейского возраста находится в метакarbonатной породе, которая является частью пакета пластов железа с полосами зеленого камня (BIF)



внутри надвиговой колонны в северной части мавританского пояса. В окрестностях есть несколько подобных месторождений меди и золота. На основании характеристик месторождения Гуэлб Могрейн и его геологической среды были выделены пять участков, которые считаются допустимыми для минерализации типа IOCG, аналогичной Гуэлб Могрейн.

## 3. МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ ИОСГ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**Магнетит** обычно встречается в различных геологических средах как основной или вспомогательный минерал. Он образуется при более низкой температуре из гидротермальных флюидов и концентрируется, образуя гидротермальные месторождения магнетита, или он может кристаллизоваться из высокотемпературных силикатных и сульфидных расплавов. Магнетит является обычным рудным минералом во многих полосчатых железных формациях, также обнаруживается в различных количествах в самых разных геологических средах. Его универсальность объясняется его формированием при относительно высоких температурах и соответствующих режимах  $fO_2$ . При более низкой температуре он концентрируется с образованием гидротермальных отложений магнетита, а при высокой температуре он кристаллизуется вместе с силикатно-сульфидными минералами из первичных магматических расплавов. Это может быть продемонстрировано на диаграмме  $\log fO_2$ - $T$  с барьерами системы Fe-OS и схематической фазовой диаграмме  $fO_2$ - $fS_2$  для системы Fe-OS (рис. 7А и В).

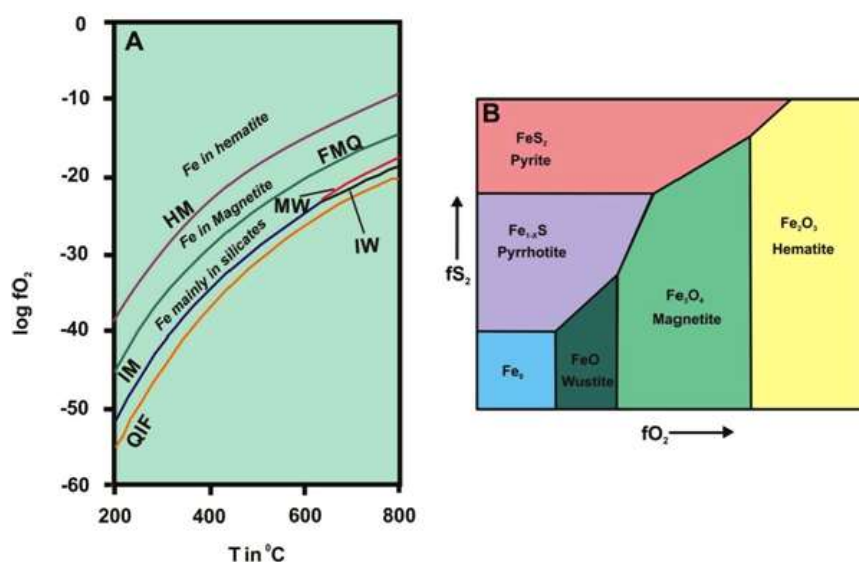


Рис. 7. (А) Диаграмма  $\log fO_2 - T$ , представляющая соответствующие поля для системы Fe-Si-O, где HM: гематит – магнетит, FMQ: фаялит – магнетит – кварц, MW: магнетит – вюстит, IW: железо – вюстит, IM: железо-магнетит, QIF: кварц-железо-фаялит. (В) Схематическая фазовая диаграмма  $fO_2$ - $fS_2$  для системы Fe-O-S.

Нижний предел стабильности магнетита при минимальной летучести кислорода для любой заданной температуры - это барьерная линия железо-магнетит (IM) или магнетит-вюстит (MW). Включение Fe в магнетит и силикаты отмечается барьерной линией фаялит-магнетит-кварц (FMQ). Выше линии FMQ железо в основном присутствует в магнетите, в то время как включения Fe в силикатах присутствуют ниже линии FMQ. Большая часть Fe находится в самородном состоянии ниже линии кварц-железо-фаялит (QIF). Линия барьера гематит-магнетит (HM) отмечает верхний предел стабильности магнетита, выше которого гематит является основным минералом оксида железа. Составы магнетита позволяют выявить физико-химические условия, в которых он образовался. Микроэлементы, обычно присутствующие в структуре магнетита, включают Mg, Al, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Zn, Ga,

Ge, Y, Hf, Nb, Mo, Ta и Zr в дополнение к Fe. Эти микроэлементы являются полезными петрогенетическими индикаторами для поисков. Включение микроэлементов в магнетит зависит от многих факторов, включая сходство ионного радиуса и валентностей катионов, летучести кислорода ( $fO_2$ ), состава магмы/жидкости и температуры. Было использовано распределение микроэлементов для дифференциации магнетита, кристаллизованного из силикатных расплавов, кристаллизованного из сульфидных расплавов и гидротермальных флюидов. Состав магнетита варьируется в различных типах рудных месторождений, таких IOCG, IOA, порфировые, скарны, магматические Fe-Ti-V-Cr, Ni-Cu-PGE, Cu-Zn-Pb вулканогенные массивные сульфиды (VMS) и архейские порфиры Cu-Au.

*Apatum* также полезен в качестве индикатора месторождений IOCG для регистрации состава вмещающих пород и летучих веществ, присутствующих в кристаллической структуре апатита, которая, в свою очередь, отражает содержание летучих веществ в исходных магмах. Помимо магнетита, апатит часто является наиболее распространенным и важным вспомогательным минералом, присутствующим в широком диапазоне изверженных, метаморфических и осадочных сред. Из-за низкой растворимости  $P_2O_5$  в силикатах и ограниченного количества фосфора, приемлемого для обычных породообразующих минералов, апатит встречается в низкой концентрации в большинстве магматических пород. На основании концентраций F, Cl и OH апатит можно разделить на фторапатит, хлорапатит и гидроксилapatит. Как важный компонент многих месторождений полезных ископаемых, апатит также эффективно использовался в качестве металлогенического индикатора месторождений IOCG. Основные, второстепенные и редкие элементы, а также концентрации РЗЭ в апатите контролируются различными факторами, такими как температура, давление, летучесть кислорода и состав материнской магмы.

Присутствие апатита и магнетита является типичным признаком IOCG месторождений: Кируна в Швеции, Нингву в Китае, Эль-Лако в Чили, Иса в Австралии, Ханлог в Иране и др.

### **Эволюция магнетита и апатита на примере месторождения Букия (Индия) [11].**

Палеопротерозойское месторождение Букия уникально по своим минеральным ассоциациям, таким как сульфиды меди, графит, турмалин, карбонаты и альбит, что заметно отличает его от других IOCG месторождений. Магнетит и апатит присутствуют в значительных количествах вместе с другими сульфидами.

Основными литотипами месторождения (рис. 8) являются кварцит, мрамор, альбитит, турмалинит, известково-силикатные породы, слюдяной сланец и амфиболит

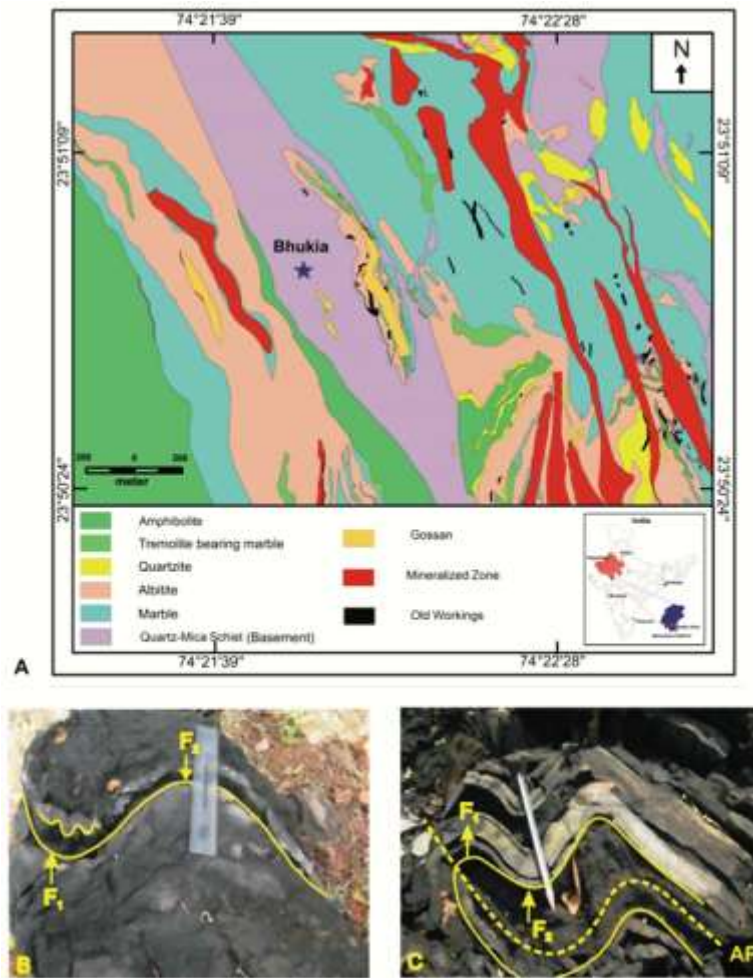


Рис. 8. (А) -геологическая карта. (В, С) изоклиальная складчатость известково-силикатных пород - основные структурные элементы месторождения

Эти литоуниты подверглись метаморфизму фации зеленых сланцев. Рудные минералы включают пирротин, арсенопирит, халькопирит, пирит, леллингит, а также магнетит, графит, гетит и самородное золото. Минерализация контролируется как структурно, так и литологически. Петрографические исследования подтверждают локализацию минерализации по плоскостям сланцеватости. Преобладающие трещины сдвига, присутствующие в зернах альбита, содержат минерализацию (рис. 9).

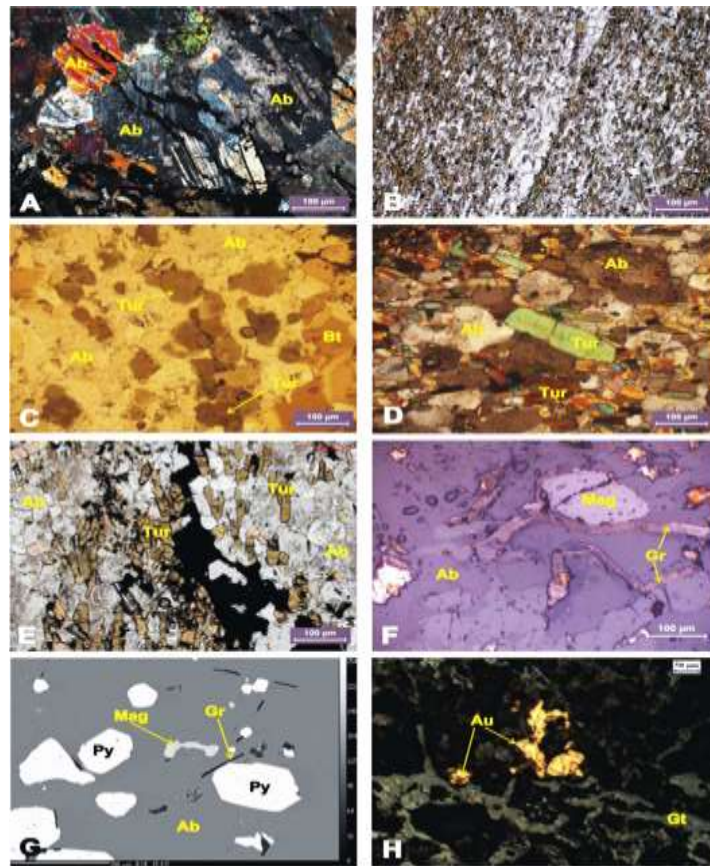


Рис. 9. Микрофотографии и изображения EPMA-BSE минеральных ассоциаций, зон гидротермальных изменений и системам сдвига. (А) - трещины сдвига, пересекающие зерна альбита. (В) - мелкозернистые, тонкослоистые, зональные коричневые зерна турмалина, присутствующие в альбититах. (С) - эиэдральные, округлые, зональные, зеленые турмалины вместе с биотитом, связанным с альбититами. (D) - удлиненные призматические зональные зеленые турмалиновые зерна в альбититах. (Е) - обширные гидротермальные изменения - альбитизация и турмалинизация. (F) - взаимосвязь между графитом, магнетитом и силикатами. (G) EPMA-BSE - графит, связанный с минерализованными сульфидами. (H) - самородное золото с гетитом в зоне госсана.

Альбитизация и турмалинизация - основные типы изменений, зафиксированные в минерализованных залежах вместе с графитом. Обширные изменения Na-Al и Na-B-Ca-Fe-Ti присутствуют в ранней и поздней фазах и представлены развитием альбитита, турмалина, кальцита/доломита, мартита и титанита. Альбитит составляет основную часть зон гидротермальных изменений. Ассоциация графита с альбититом предполагает графитизацию и связана с обширным Na-метасоматозом.

Значения  $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$  (PDB) около -18‰ предполагают органическую природу углерода в графите. Позже, за счет смешения гидротермального углерода и органического углерода, выпали карбонаты. Образование графита из органического углерода-предшественника, усиленного дальнейшим гидротермальным притоком, привело к осаждению золота. Поздняя фаза изменения - мартитизации. Магнетит замещается гематитом в окислительной среде, который позже замещается гетитом в сильно окисленной зоне госсана.

#### *Этапы минерализации по отношению к магнетит-апатиту.*

Зона Au-Cu оруденения находится в пределах альбитит-графитовых пород с большим содержанием апатита. Исследования подтверждают эволюцию флюидов от

высокотемпературных магматических гидротерм к низкотемпературным рассолам. Температура минерализующейся жидкости колеблется от низкой (110°C) до высокой (560°C) с наличием контрастной солености от 5 до 30 мас.%. Участие магматических гидротермальных флюидов в оруденении подтверждается (помимо характеристиками флюидных включений) и другими ключевыми особенностями: 1) наличием синтетектонических гранитных интрузивных тел в ближайших окрестностях; 2) присутствием сульфидных ассоциаций пирротин-арсенопирит-пирит-леллингит-халькопирит наряду с золотом; 3) существованием обширного метасоматоза Na-B-Si и 4) обедненные значения  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ . Имеются доказательства наличия ультра-соленых условий минерализации, таких как 1) наличие проксимальных и дистальных зон натриенных изменений; 2) наличие высокомагнезиальных дравитов и 3) присутствие флюидов с высоким содержанием соли в минерализованных зонах и флюидов с низкой соленостью в безрудных зонах. Значения  $\delta^{18}\text{O}$  карбонатов намного ниже, чем значения карбонатов немагматических эвапоритовых сред. Данные по флюидным включениям кварца с высокой соленостью указывает на роль гранитов в их формировании.

Магнетит и апатит встречаются в двух разных стилях: 1) в виде вкрапленных зерен и 2) в виде кварц-карбонат-апатитовых жил. Предполагается, что магнетит и апатит выделяются из исходных высокотемпературных гидротермальных флюидов на первой стадии минерализации в относительно окисленном состоянии, что указывает на высокую летучесть кислорода. На второй стадии оставшиеся гидротермальные флюиды, богатые Fe-P, смешивались с относительно низкотемпературными и высокосолевыми гидротермальными рассолами, что способствовало дальнейшему осаждению магнетит-апатита. Позже флюиды, богатые железом, смешиваются с гидротермальными флюидами с более низкими температурами и связанными с ними лигандами, что способствует созданию подходящих восстановительных условий для осаждения сульфидов, таких как пирротин, арсенопирит и пирит, наряду с альбитом и турмалином. При дальнейшем понижении температуры в системе минерализации осаждался графит из-за смешения низкотемпературных гидротермальных флюидов с предшественником органического углерода.

Минеральная парагенетическая последовательность различных минеральных фаз, идентифицированная по взаимосвязям между вмещающими породами и рудой, структурными особенностями, рудными ассоциациями, минерализацией, связанной с зонами гидротермальных изменений, и минерализацией, связанной со структурными событиями представлена на рис. 10.

	Evolution of important mineral phases at Bhukia Gold Deposit		
	Dissemination Stage I	Shear planes Stage II	Fractures/ Replacement Stage III
Albite	=====	=====	=====
Tourmaline		=====	=====
Magnetite	=====	=====	
Apatite	=====		
Martite		=====	
Goethite			=====
Pyrrhotite		=====	=====
Pyrite		=====	=====
Arsenopyrite		=====	=====
Chalcopyrite		=====	=====
Graphite		=====	=====
Gold		=====	=====

<sup>#</sup>Invisible/Substrate <sup>#</sup>Nuggets/Native

Рис. 10. Развитие золотого оруденения по отношению к различным оксидам, сульфидам и измененным минералам показано в парагенетическом порядке, основанном на взаимосвязях между минеральными комплексами вмещающих пород - руда, текстурными и микроструктурными взаимосвязями/контролем и минерализацией, окружающей зоны гидротермальных изменений.

### *Минералогическая характеристика магнетита и апатита .*

Полевые исследования, оптическая микроскопия и ЕРМА показывают, что магнетит имеет форму типичных идиоморфных зерен, расположенных параллельно трещинам сдвига, в виде повернутых зерен в слюдяно-сланцевых, альбититовых и богатых турмалином альбититовых породах (рис. 11А).

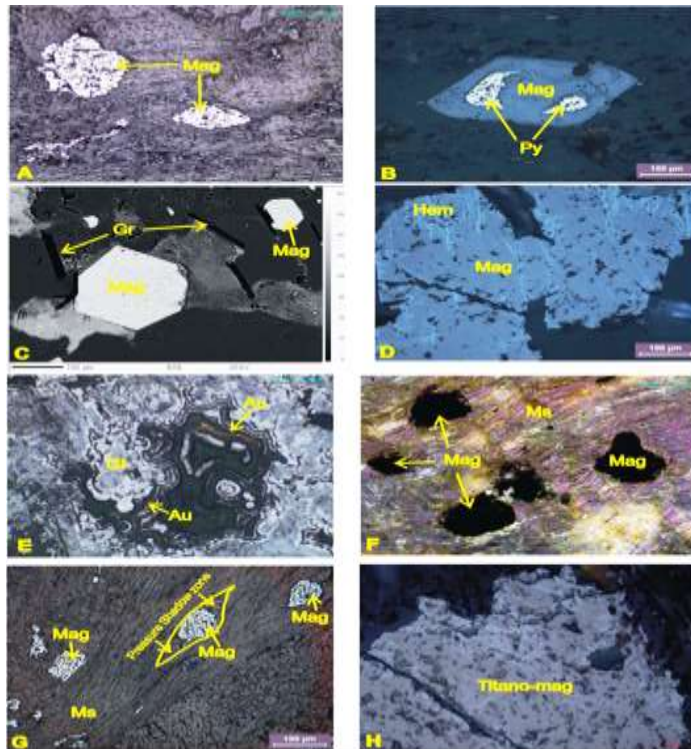


Рис. 11. Микрофотографии различных генераций минеральных ассоциаций, таких как магнетит-мартит-гетит-сульфид-графит-золото, и их связи с характеристиками зоны сдвига и характером деформации. Повернутая деформированная ткань зерен магнетита в слюдяном сланце выстроена параллельно плоскостям рассланцевания S1, проявляя сигмоидальные формы; Идиоморфный магнетит второй генерации ассоциирован с зернами пирита первой генерации; BSE-изображение идиоморфного магнетита, связанного по границам зерен гидротермальных реек графита; Процесс мартитизации, предполагающий низкую температуру эволюции и высокие условия окисления; Тонкослойное золото осаждается вдоль зон слабого роста и выборочно замещает коллоидный гетит в зоне госсана; Интенсивные сдвиговые характеристики деформированного мусковита с полосами перегиба, растворение под давлением мельчайших пластинок кварцевых зерен, пинч и набухание, деформированные и повернутые зерна магнетита вдоль плоскостей слоистости кварцево-слюдяного сланца. Развитие теневой зоны

давления магнетита; Крупнозернистый титаномагнетит с октаэдрическим сколом, который, в свою очередь, занят гематитом.

Магнетит во многих местах тесно связан с сульфидами наряду с золотом и графитом (рис. 11В и С). Мартитизация является наиболее заметной особенностью, когда гематит встречается вдоль трещин, трещин, границ зерен, а иногда и вдоль октаэдрических плоскостей магнетита (рис. 11D) вместе с гетитом (рис. 11E). Зерна магнетита деформируются и показывают предпочтительную ориентацию вместе с силикатами в зоне сдвига, образуя тени давления и в виде повернутых зерен (рис. 11F и G). Титаномагнетит, присутствующий в районе Бхукия, предполагает более высокую летучесть кислорода (рис. 11H). Апатит - важный аксессуарный минерал, присутствующий в альбититовых и карбонатных породах в районе Бхукия (рис. 12А и В). Во многих местах апатит связан с зернами магнетита (рис. 12С). Включения сфена также можно увидеть в зернах апатита (рис. 12D – F).

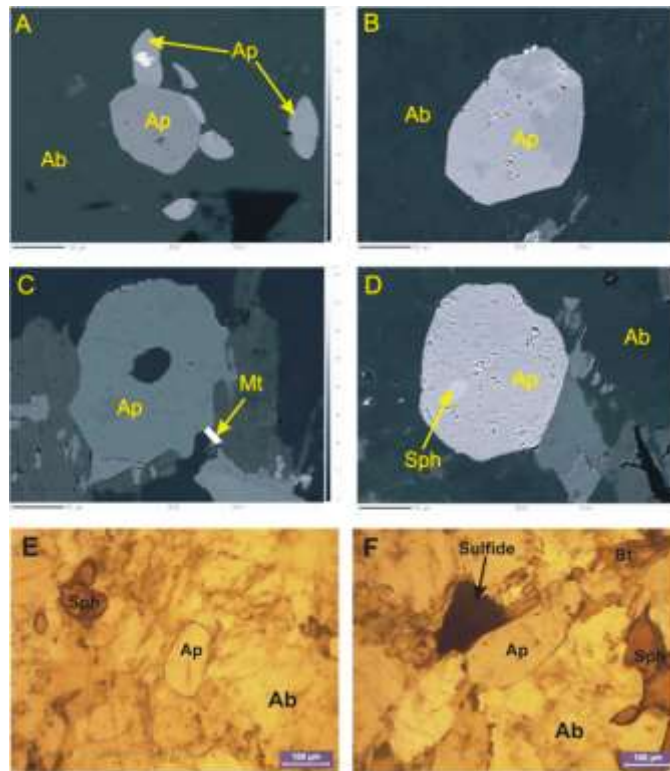


Рис. 12. EPMA BSE изображения и микрофотографии минеральных фаз апатита; (А) Округлые или субокруглые выровненные зерна апатита, окруженные удлиненными и вытянутыми зернами сфена, оба участвовали в сдвиговом действии в пределах вмещающих альбититовых литонитов; (В) Крупнозернистое деформированное зерно апатита; (С) планка магнетита второго поколения в ассоциации с апатитом в карбонатах; (D) Округлый сфен, окруженный апатитом внутри альбитита. (Е) Микрофотография апатит-сфеновой ассоциации в альбитите. (F) Микрофотография, показывающая наличие линзовидного зерна апатита вместе с золотосодержащей сульфидной минерализацией.

Минеральный химический анализ был проведен на основные, второстепенные и следовые элементы магнетита (Zn, Cu, Ni, Mn, Mg, Cr, V, K, Sn, Ca, Ti, Al, Si) и апатита (Na, Mg, Al, Si, Zn, Fe, Ca, Cr, B, F, P, K, Ti и V) с помощью электронно-зондового микроанализатора (EPMA) CAMECA SX-5, оснащенного спектрометрами с пятиволновой дисперсией. Магнетит и апатит исследовались под микроскопом с помощью изображений BSE (обратно-рассеянных



электронов). EPMA был проведен с использованием режима дисперсии длин волн с током пучка 15 нА, напряжением возбуждения 15 кВ при размере пучка 5 мкм. Время пика и фона составляет 10 с и 5 с соответственно. Обработка данных проводилась с использованием метода X-Phi.

Раскрашенное рентгеновское картирование магнетита показывает максимальную концентрацию равномерно распределенного Fe и рассеянное распределение Al и Si. Ni и V (рис. 13а), равномерное распределение основных элементов, таких как Ca и P, в случае апатита, помимо F, Ce и Y (рис. 13б).

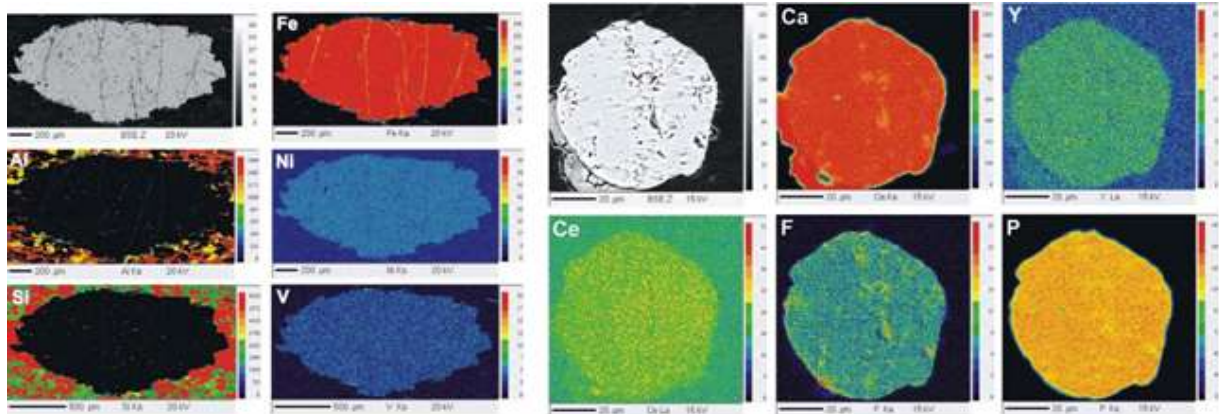


Рис. 13. Цветные рентгеновские карты, полученные с помощью EPMA, изображающие элементные вариации зерен магнетита и апатита: (А) Распределение Fe, Al, Ni, Si и V в магнетите без какой-либо заметной зональности, что является обычным для типичных месторождений IOCG; (В) Распределение Ca, Y, Ce, F и P в зерне апатита, показывающее значительные значения F и более низкие значения Cl, что указывает на его типичный фторапатитовый характер.

Определение характеристик редких и редкоземельных элементов в магнетите и апатите проводилось с помощью масс-спектрометрии с лазерной абляцией и индуктивно связанной плазмой (LA-ICP-MS) с использованием системы лазерной абляции Cetac 213 нм Nd YAG, которая подключена к квадрупольному ИСП-МС Varian 820. Абляция проводилась с частотой следования импульсов 10 Гц, размер пятна 30–60 мкм и энергия 730 В. Образцы были проанализированы в режиме скачкообразной перестройки пика с каждым анализом, состоящим из 20-секундного измерения фона при выключенном лазере и 40-секундного измерения максимального сигнала при включенном лазере. Стекло NIST 612 использовалось для целей калибровки, и данные были синтезированы с использованием программного обеспечения Glitter с Fe в качестве внутреннего стандарта для магнетита и Ca для фторапатита. В пределах последовательности воспроизводимости  $2\sigma$ , оцененная из повторных анализов стекла NIST 610, составляет: V, Co, Rb, Mo, Ag, <3%; Ni, Sr, Ba, La, Pr, Nd <5%; Sc, Ti, Zn, Y, Zr, Nb, La, Ce, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, <10%; W <12%; а также Fe <21%. Разрешенные во времени сигналы LA-ICP-MS для La/Ce и Zr тщательно отслеживались на предмет любых эффектов включений монацита и циркона соответственно. Следующие элементы были нормализованы - Eu-аномалия ( $Eu/Eu^*$ ) N рассчитывается как  $[EuN/SQR(SmN * GdN)]$ , а аномалия Ce рассчитывается как  $[CeN/SQR(LaN * PrN)]$ .



имеет более низкую концентрацию Ti, Al, V и Cr, от умеренной до более низкой концентрации Si и Ca и широкий диапазон содержания Mg. Магнетит также может образовываться в результате метаморфизма сульфидов и имеет низкую концентрацию Ti, Cr, V, Ni и Mn. Ограничения на вариации химического состава микроэлементов показаны на рис. 14.

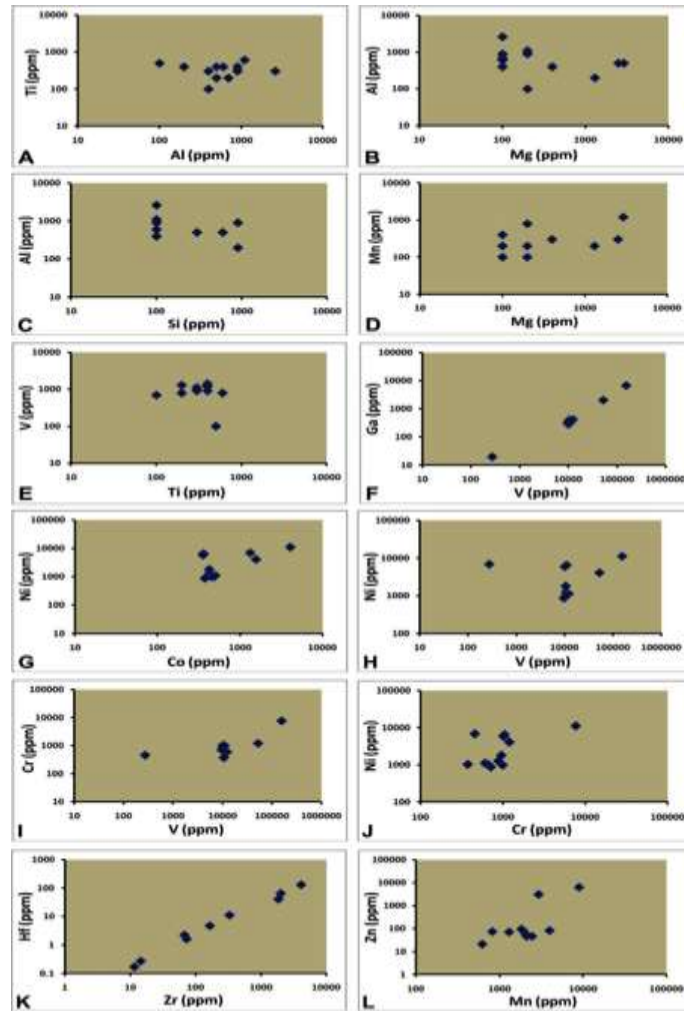


Рис. 14. Вариации химического состава минералов с использованием LA-ICP-MS и EPMA в магнетите, отображающие взаимосвязи между важными основными и следовыми составляющими: то есть более высокие значения Ni, V, Co и соотношение Ni/Cr, отражающие среду IOCG.

Соотношение между второстепенными и редкими элементами магнетита из исследуемой области сильно влияет на геохимию вмещающих пород. Было отмечено, что Mg, Al, Ti, V, Cr, Mn, Ni и Ca имеют значительную генетическую коннотацию из месторождений IOCG, основанных на их вариациях в магнетите.

#### ***Магматический и гидротермальный магнетит***

Концентрации следовых элементов в магнетите зависят от состава жидкости или воды и процессов концентрации магнетита. Как было сказано выше, микроэлементы, присутствующие в магнетите, используются для дифференциации между магматическими и гидротермальными типами месторождений. Магматический и гидротермальный магнетит обладают разными химическими и текстурными признаками. Основные факторы, которые контролируют концентрации микроэлементов, присутствующих в магматическом магнетите,

включают состав магмы, сосуществующие минералы, летучесть кислорода ( $fO_2$ ), температуру, давление, скорость охлаждения, летучесть серы ( $fS_2$ ) и активность кремнезема. Температура, состав жидкости, летучесть кислорода и серы, активность силикатов и сульфидов, буферизация вмещающих пород, процессы повторного уравнивания, ионный радиус и баланс заряда являются факторами, ответственными за переменные концентрации микроэлементов в магнетите из различных типов гидротермальных месторождений. Такие микроэлементы как Mg, Ti, V, Cr, Ni и Co могут различать магматическое и гидротермальное происхождение магнетита. Широкий диапазон концентраций Mg в магнетите (100–2900 ppm) указывает на его гидротермальное происхождение, как и отношение Co/Ni ниже 1 (0,05–0,48), низкие концентрации Ti, Al, Zr, Hf, Nb и Ta, более высокие концентрации Ni, V, Co, Zn и Mn. Большинство гидротермальных магнетитов содержат Ti менее 2 мас.% и Al <1 мас.%. Средняя концентрация Ti и Al в магнетите составляет ~350 ppm и ~890 ppm соответственно, что подтверждает его магматическое гидротермальное происхождение. Концентрации Mg важны, чтобы различать магматический и гидротермальный магнетит. Для магматического магнетита концентрация Mg колеблется от 100 до 1000 ppm, тогда как гидротермальный магнетит имеет более широкий диапазон концентрации до 2900 ppm. Это может быть результатом эволюции флюида от исходного высокотемпературного магматического гидротермального флюида к низкотемпературным рассолам. Концентрации микроэлементов (Ti против Ni/Cr) указывают на гидротермальные характеристики магнетита (рис. 15А). Отношение Ni/Cr для магматического магнетита составляет  $\leq 1$ , поскольку оба они совместимы с силикатными магмами во время фракционирования, в то время как во многих высокотемпературных магматических гидротермальных условиях, таких как скарн, IOCG, IOA и порфир, Отношение Ni/Cr в магнетите  $\geq 1$ . Это можно объяснить различиями в растворимости и подвижности Ni и Cr в гидротермальных флюидах.

Концентрации Co, Ni, Cr, Ti и V были использованы для разделения гидротермального и магматического магнетита, поскольку считается, что концентрации этих элементов в магнетите отражают природу материнской магмы и образующихся флюидов.

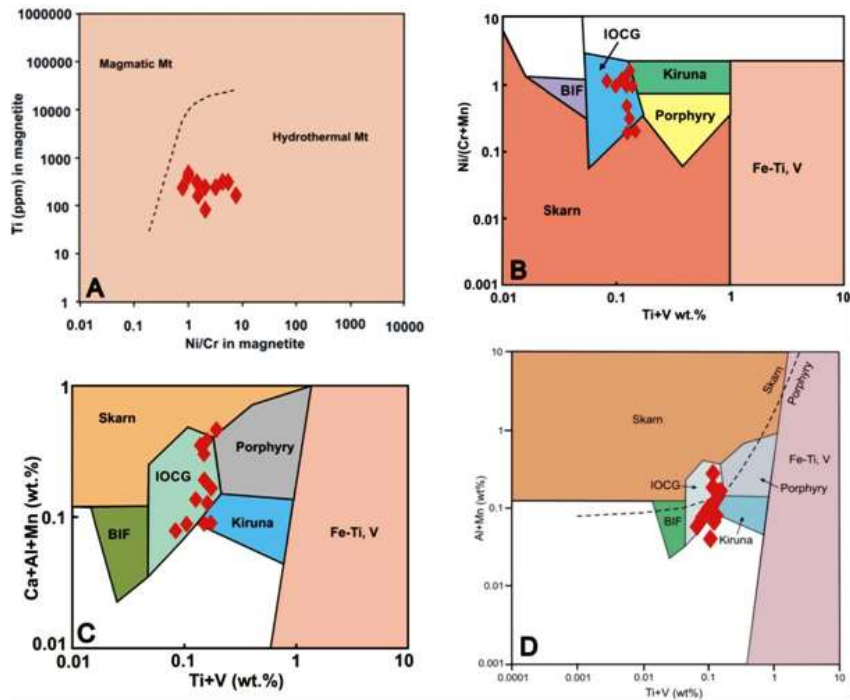


Рис. 15. Эволюция магнетита на месторождении IOCG: (A) - магматические и гидротермальные магнетиты различаются на основе Ti и Ni/Cr. (B) - Ni/(Cr + Mn) в сравнении с Ti + V. (C) - Ca + Al + Mn против Ti + V и (D) - Al + Mn против Ti + V.

### Магнетит в месторождении IOCG

На основе сигнатур Ni / (Cr + Mn) против Ti + V и Ca + Al + Mn против Ti + V концентрации микроэлементов в магнетите показывают их типичную ассоциацию IOCG (рис. 15B и C), а значения Al + Mn в сравнении с Ti + V также предполагают, что магнетит связан с типом месторождения IOCG (рис. . 15D).

Некоторые важные вариации микроэлементов для магнетита (Mt) были нормированы на объем континентальной коры, чтобы идентифицировать возможный источник. Многоэлементное распределение в магнетите сходно полям IOCG, как показано на рис. 16.

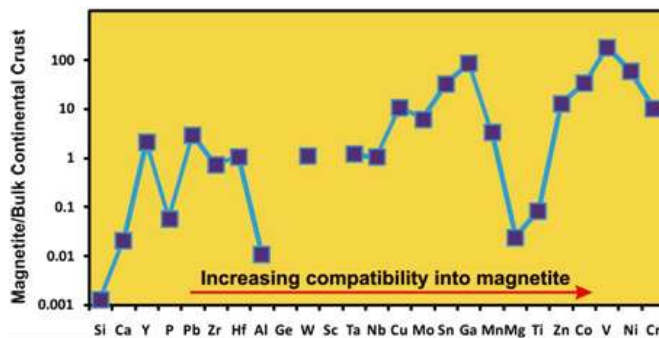


Рис. 16. Многоэлементная вариационная диаграмма для магнетита, нормированного на объемную континентальную кору в порядке возрастания совместимости с магнетитом, что характеризует IOCG.

Роль летучести кислорода ( $fO_2$ ) очень важна для состава магнетита. Присутствие V и Ti в магнетите сильно зависит от летучести кислорода, тогда как такие элементы, как Ca, Ni, Co и Mg, не влияют на летучесть кислорода. В тех же магматических условиях летучесть кислорода уменьшается с обогащением Ti и V. Cr и Mn также связаны с летучестью кислорода. Наличие Al и Ti в магнетите является также важным температурным индикатором для формирования месторождений IOCG (200–650°C). Изменения состава гидротермального



Кальций и фосфор являются наиболее распространенными элементами, присутствующими в апатите, и их концентрация колеблется от 39,02 до 40,08 мас.% и 17,43–18,49 мас.% соответственно. Апатит относится к фторапатитовой разновидности, поскольку содержание фтора значительно (1,87–4,85 мас.%). F и Cl демонстрируют отрицательную динамику (рис. 17а).

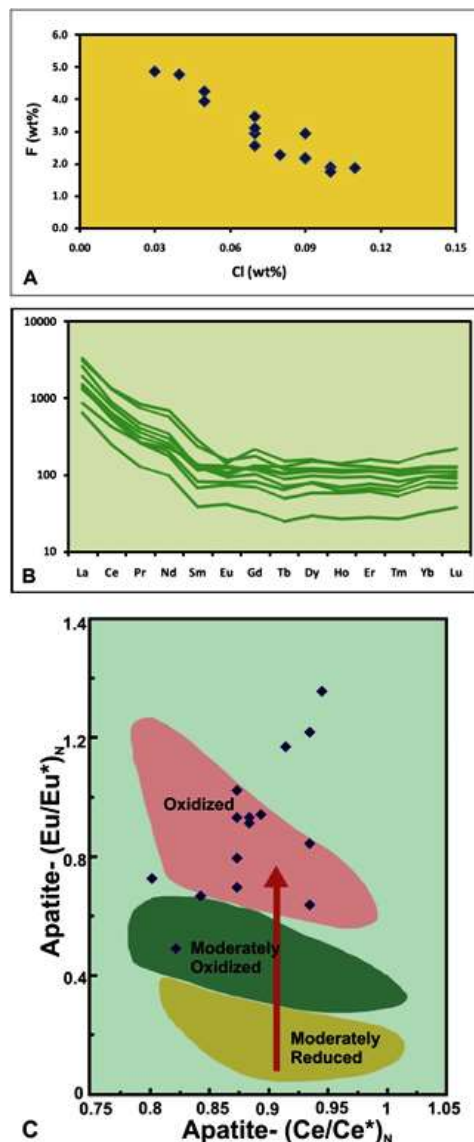


Рис. 17. Вариации химического состава микроэлементов в зернах апатита; (А) - Cl показывает отрицательный тренд по отношению к более высоким значениям F, что указывает на природу фторапатита. (В) - LA-ICP-MS аналитические результаты нормированных на хондрит РЗЭ из апатита, показывающие обогащение легкими РЗЭ по сравнению с MREE и HREE, с отрицательной аномалией Eu, схожей с апатитом, связанным с месторождениями IOCG-IOA; (С) - образцы эволюции апатита в диапазоне от умеренно до высокоокислительной среды, как видно из  $Eu/Eu^*$  против  $Ce/Ce^*$ .

Истощение Cl (0,03–0,11 мас.%) с обогащением F предполагает переплавление ранее существовавших мета-вулканогенно-осадочных материнских пород, которые имели обогащение F и последующую потерю Cl из-за его более высокой растворимости. Концентрация Mg в апатите достигает 100 ppm, как это обычно бывает в ассоциации IOCG-IOA. Концентрация Y варьируется от 65-644 ppm с более низкой концентрацией Sr (44-79 ppm), отражая контрастное поведение этих элементов в процессе фракционирования. Более низкая концентрация Sr в апатите указывает на разделение Sr в плагиоклазе.

Апатит содержит 551–2959 г/т РЗЭ. Спектры РЗЭ в образцах апатита показывают обогащение легкими РЗЭ ( $\Sigma$ LREE = 504–2696 м.д.) и низкое содержание РЗЭ до обедненных MREE и HREE ( $\Sigma$ MREE = 22–139 м.д. и  $\Sigma$ HREE = 26–263 г/т) с отрицательной Eu аномалией (Eu/Eu \* = 0.5–1.38) (рис. 146). Более низкие значения Mn и Y/REE вместе с более высокими значениями (La / Sm) и (Ce/Th) указывают на то, что апатит кристаллизовался из сильно окисленной среды. Изменение содержания As и V в апатите от 400-800 ppm до 100-300 ppm соответственно указывает на окислительную среду. Eu/Eu \* в сравнении с Ce/Ce \* предполагает окисленный источник апатита. Более низкие концентрации Cd и Na наряду с переменными Th/U предполагают метавулкано-осадочный источник апатита. Наличие обширных гидротермальных изменений, обилие магнетита над гематитом, присутствие Cu+Au+REE, наличие пирита поздней стадии и присутствие апатита дополнительно подтверждает ассоциацию IOCG-IOA. Сравнение палеопротерозойского месторождения Бхукья и других ключевых протерозойских месторождений IOCG показано в таблице 3.

Табл. 3 Сравнение палеопротерозойского месторождения Бхукья с месторождениями IOCG.

Deposit	Age	Host rocks	Structural setting	Ore minerals	Absent/min	Tonnage and grade	Elemental associations	References
Olympic Dam, Gawler Craton, Australia	1300 Ma, Mesoproterozoic	A-type granite, Meta-volcanic rock	Fluid controlled breccia complex at intersection of major faultlines formed at shallow crustal levels	Bornite, chalcopyrite, chalcocite, native copper, gold, magnetite, hematite, pyrite, arsenite	Quartz, hematite, sericite, chlorite and carbonate	9576 Mt at 1.2% Cu, 0.5 g/t Au, 0 g/t Ag, 0.04% U3O8, 0.05% REE	Fe, Cu, Au, Fe, Ba, LREE, U, Ag, Co, P	Ferris (2010), Hayward and Skinner (2012), Fritz et al. (2012) and Zhu (2016)
Ernest Henry, Mount Isa Inlier, Northern Australia	1324–1304 Ma, Mesoproterozoic	Intermediate metamorphosed felsic volcanic rock, diorite, quartzite, calc-silicate rock	Hydrothermal breccia in ductile-brittle shear zone, some stratified in carbonaceous host rocks	Chalcopyrite, gold, hematite, magnetite, pyrite, pyrrhotite	Albite, feldspar, quartz, biotite, garnet, chlorite, muscovite, magnetite, diopside and kankriolite	228 Mt at 1.1% Cu and 0.5 g/t Au	Fe, Cu, Au, Mn, Mo, As, Ca, Ba, F, U, W, LREE	Williams et al. (1999), Clark et al. (2004), Oliver et al. (2004), Foster (2010), Dawson et al. (2014)
Stans, Mount Isa Inlier, Northern Australia	> 1000 Ma, Mesoproterozoic	Ironstones, mica-schists, calc-silicates, amphibolites	Ductile-brittle shear zone, breccia	Magnetite, hematite, chalcopyrite, pyrite, gold, chalcocite, bornite	Albite, quartz, calcite, arsenite, chlorite, biotite, muscovite, hematite and magnetite	283 Mt at 0.54% Cu and 0.48% Au	Fe, Cu, Au, Co, W, Sn, F, Mo, LREE	Rocheham et al. (1988), Williams et al. (2001), Oliver et al. (2004), Zhu (2016)
Mc Elroy, Cloncurry district, Mount Isa Inlier, Northern Australia	1510 Ma, Mesoproterozoic	Carbonaceous schist, phyllite, Amphibolite, trachypandite	Breccia and veins in chloritoid zone in shear zone controlled by brittle fault	Magnetite, pyrite, pyrrhotite, chalcopyrite	Albite, arsenite, diopside, hematite, apatite and magnetite	570 Mt at 3.6% Cu and 1.8 g/t Au	Fe, Cu, Au, Co, Ni, F, P, LREE, Mn, Se, Th, U	Clark et al. (2001), Wang and Williams (2001), Oliver et al. (2004), Zhu (2016)
Alonzo, Carajas district, Southern Amazon Craton, Brazil	Paleoproterozoic	Mesovolcanic rocks, diorite dykes, siderite-chlorite breccia	Steeply dipping tabular breccia bodies	Magnetite, chalcopyrite, bornite, hematite, gold	Albite, K-feldspar, calcite, epidote, sericite, biotite	219 Mt at 1.40% Cu and 0.86 g/t Au	As, Cu, Zn, Ca, Mo, U, LREE	Ruggie and Fordham (1986), Ruggie et al. (2001), Xavier et al. (2012), Zhu (2016)
NICO, Great Bear Magmatic Zone, Canada	1850 Ma, Paleoproterozoic	Sub-alkalic rocks, rhyolite, diatreme	Diatreme and fracture breccia at intersection of structural lineaments	Magnetite, hematite, arsenopyrite, cobalt, hematite, pyrite, pyrrhotite, chalcopyrite	K-feldspar, magnetite, carbonates, chlorite, hematite	42 Mt at 0.1% Co, 0.5 g/t Au and 0.1% Bi	Fe, As, Co, Au, Bi, W, Te, Ba, B, P, F, LREE	Good et al. (2000), Zhu (2016)
See-Okwan, Great Bear Magmatic Zone, Canada	1850 Ma, Paleoproterozoic	Rhyolite (quartzite) marginal to igneous pluton	Diatreme breccia at intersection of structural lineaments	Hematite, magnetite, chalcopyrite, bornite, chalcocite, covellite, molybdenite	K-feldspar, hematite, magnetite, quartz, garnet, epidote, fluorite	17.3 Mt at 0.72% Cu, 3.7 Ag and 0.06 g/t Au	Fe, Cu, Ag, U, Mo, Ba, P, Bi, Co, F, REE	Good et al. (2000), Zhu (2016)
Tjörnehojda, Sweden	Paleoproterozoic	Anatexite metamorphic rock, felsites	Shear/fault zone to intersection of two major shear zones	Chalcopyrite, bornite, magnetite, pyrite, chalcocite, covellite	Albite, biotite, magnetite, apatite, carbonates	3.2 Mt at 0.9% Cu	Ca, Fe, P, F, Ba, Au, Ag, Te, Mn, Th, REE	Erdtelt and Martinsson (2003), Erdtelt et al. (2004)
Nararvan, Sweden	Paleoproterozoic	Intermediate metamorphic rocks(?)	Shear zone	Chalcopyrite, magnetite, pyrite, Sphalerite, galena, molybdenite, bornite, chalcocite	Albite, K-feldspar, biotite, magnetite, garnet, hematite	0.83 Mt at 2.4% Cu, 1.3 g/t Au and 11 g/t Ag	Ca, Fe, Au, Ag, Ba, B, Co, Zn, W	Martinsson and Söderman (2004)
Laurinda, Finland	1800 Ma, Paleoproterozoic	Mafic metamorphic rock, diorite, mica grains, quartzite, marble (?)	Vein in reverse thrust/fault zone	Magnetite, pyrite, pyrrhotite, chalcopyrite, gold, molybdenite	Albite, K-feldspar, biotite, magnetite	33 Mt at 4% Fe, < 0.1 11.0% Cu, < 0.3–0.6 g/t Au and < 0.1–17.7 Ag	Fe, Cu, Au, Ag, Ba, Bi, Mo, Se, Sb, Te, LREE	Hirvonen (1982), Hirvonen et al. (2007) and Hellsten et al. (2013)
Rounavaan, Finland	1800 Ma, Paleoproterozoic	Mafic metamorphic rock, diorite	Vein in reverse thrust/fault	Magnetite, pyrite, pyrrhotite, chalcopyrite, arsenite	Albite, biotite, K-feldspar, Ti-silite, chlorite, magnetite	4 Mt at < 0.1–1.5% Cu, < 0.1–2.6 g/t Au and < 0.1–1.3 g/t Ag	Fe, Cu, Au, Ag, Ba, Bi, Mo, Se, Sb, Te, U, LREE	Hirvonen (1982), Hirvonen et al. (2007), Hellsten et al. (2013) and Zhu (2016)
Don-Idaly, St Francois Terrane, McKinnon, Missouri, USA	Mesoproterozoic	Syenite, rhyolite	Breccia, vein and replacement mineralization at contact of central intrusive complex	magnetite, hematite, bornite, pyrite, molybdenite, cobaltite, cuprite, chalcopyrite, bornite, sphalerite, galena, chalcocite	K-feldspar, garnet, calcite, fluorite, gypsum, chlorite and quartz, epidote	40 Mt at 0.8% Cu	Fe, Cu, As, Ag, Mo, Co, REE	Ferris (2010)
Warrego, Tennant Creek Inlier, northern Australia	Paleoproterozoic	Quartz-muscovite schist, quartzite, silt	Mammiform breccia, possibly in fold belt	Chalcopyrite, native gold, covellite, hematite, magnetite, bornite	Albite, chlorite, biotite, muscovite, magnetite	0.750 Mt at 6.5 g/t Au and 1.0% Cu	Fe, Cu, Au, Bi	Ferris (2010)
Lala, Kangdian Terrane, Yanggou Craton, China	Mesoproterozoic	Albitite, quartzite, mica-schist, marble	Hydrothermal breccia	Chalcopyrite, magnetite, gold	K-feldspar, carbonates, magnetite, apatite, biotite, muscovite	106 Mt at 0.92% Cu and 0.19 g/t Au	Fe, Cu, Mo, REE, Au	Zhu (2014, 2015)
Dabangshan, Kangdian Terrane, Yanggou Craton, SW China	Mesoproterozoic	Marble and meta-volcanic rocks, amphibolite, Albitite	Replacement within breccia pipes, dissemination and veins	Magnetite, hematite, chalcopyrite, bornite	Albite, K-feldspar, quartz, carbonate, sericite, chlorite	192 Mt at 0.99% Cu and 0.18 g/t Au	Fe, Co, REE, Au	Zhu and Zhou (2011), Zhu (2016)
Gaoli Maghrib, West African Craton, Mauritania	Mesoproterozoic	Meta-carbonate rocks and marshallit	Breccia and multiple conducing lenses in shear zone	Magnetite, pyrrhotite, chalcopyrite, Fe-Co-Ni arsenides, arsenopyrite, cobaltite, bornite, gold, silver	Albite, biotite, garnet, calcite, diaspore, ankerite, magnetite, graphite	32.4 Mt at 1.22% Cu and 3.41 g/t Au	Fe, Co, Au, As, Co, Ag, Bi	Frost-Kilian et al. (2016)
Khetri, Anavdi Supergroup, India	Mesoproterozoic	granitiferous chlorite schist and banded amphibolite quartzite	Ironiferous-metabasalt, folding	Chalcopyrite, pyrrhotite, pyrite, magnetite, carbonite, Sphalerite, arsenopyrite, molybdenite	Chlorite, biotite, sericite	140 Mt at 1.1–1.7% Cu and 0.5 g/t Au	Ca, Fe, Zn, As, Mo, Co, Ni	Kaigali et al. (2002)
Mudali Gold Prospect, Anavdi Supergroup, India	1830 Ma, Paleoproterozoic	Albitite, carbonates, quartzite, scapolite, staurolite schist, amphibolite	Deformed superposed fold, in shear system	Pyrrhotite, arsenopyrite, pyrite, chalcopyrite, magnetite, graphite, native gold	Albitization, hematization, carbonatization, graphitization	105.18 Mt at 1.07 g/t Au and 0.15% Cu	Ca, Fe, As, Au, Ag, U, Th, LREE	CEI Bulletin Series (2014), Rameshbabu et al. (2012), Sri-AG, Mukhopadhyay et al. (2016)



Магнетит и гематит, представляющие 8 основных месторождений IOCG и IOA по всему миру, различных по геологическим условиям и возрастам оруденения, были проанализированы с помощью электронного микронзондового анализа (EMPA) и LA-ICP-MS.

Рудные образцы IOCG были разделены на основе присутствующих основных оксидов железа: (1) гематит, (2) магнетит и (3) гематит±магнетит. Точно так же рудные образцы месторождений IOA делятся на: (1) магнетит и (2) магнетит±гематит. В этих типах месторождений оксиды железа находятся как в руде, так и в ассоциациях изменений вмещающих пород. Как правило, существует несколько генераций оксидов железа. Они изучены по парагенетическим стадиям: 1) рудная стадия и 2) гидротермальные изменения вмещающих пород. Гидротермальные изменения оксидов железа сгруппированы по типу изменений: (1) Ca-Fe-изменение (Am-Ap-Mag), (2) Na (Fe) изменение (Ab-Scp-Mag/Hem), (3) высокотемпературное изменение K-Fe (BtKfs-Mag) и (4) низкотемпературное K-Fe (Ser-Kfs±Chl±Cb-Hem). Результаты показывают, что гематит в месторождениях IOCG группы гематита обеднен Zn, Ni, Mn, V и обогащен K, Ti, Al, Si по сравнению с магнетитом в месторождениях IOCG группы магнетита. В месторождениях магнетит - IOA магнетит обогащен V, Al и Mg по сравнению с месторождениями магнетит-гематит - IOA, которые обогащены Ca. По сравнению с первичным магнетитом в месторождениях Ni-Cu-PGE, магнетит рудной стадии в месторождениях IOCG обеднен Ni, Cu и Cr и обогащен Ti, Al и Si.

### **Геохимия циркона на примере кратона Голера (Австралия) [5]**

Циркон сохраняет геохимические следы условий кристаллизации и модификации. Обычно циркон используется для изучения петрогенезиса и эволюции горных пород из-за его устойчивости во время поверхностных, метаморфических и магматических процессов, а также его близости к РЗЭ, U и Th. В последнее время исследования были сосредоточены на понимании и характеристике химического состава циркона. Однако при этом возникло множество проблем, поскольку составы РЗЭ и микроэлементов могут сильно варьироваться в цирконе из одной литологической единицы и в пределах одного зерна в результате микровключений, метамиктизации, сильных различий в зональности состава и перекристаллизации. Несмотря на это, циркон успешно используется в качестве индикатора происхождения для различения магматических, метаморфических и осадочных материнских пород. Было также продемонстрировано, что циркон сохраняет геохимическую подпись, которая может быть связана с медно-порфировым оруденением. Однако использование циркона в качестве ориентира для других типов месторождений, таких как IOCG пока ограничено.

Кратон Голера в Южной Австралии хранит сложную геологическую историю, восходящую к позднему архею. На территории кратона сохранилось несколько

магматических систем, каждая из которых имеет свои уникальные геохимические характеристики, а некоторые из них связаны с оруденением IOCG, которое сформировалось в течение основного периода магматизма, деформации и метаморфизма примерно 1600-1580 млн лет назад и включает месторождения Олимпик-Дам, Проминент-Хилл и Каррапатина вдоль восточной части кратона Голера. В пределах кратона Голера циркон обычно использовался для датирования или изотопных исследований. Ограниченные исследования были сосредоточены на геохимии циркона, его изменчивости в различных вулканических комплексах.

Новые геохимические данные по циркону представлены на образцах вулканических образований хребта Гоулер. Эти образцы сохраняют характеристики калиевых и гематитовых изменений, связанных с гидротермальной активностью во время формирования оруденения IOCG 1600-1580 млн лет назад. Оценка химического состава циркона показывает, что в образцах, подвергшихся разным степеням изменений, есть характерные обогащения и обеднения в следовых количествах и химическом составе РЗЭ. Различия в химическом составе циркона между неизменными и измененными образцами приписываются химической модификации гидротермальными флюидами, богатыми фтором, которые изменили вмещающие породы и были связаны с минерализацией IOCG.

Таким образом, минералого-геохимическая характеристика магнетита и апатита методом LA-ICP-MS и EPMA предполагает, что магнетит вместе с апатитом играют ключевую роль в осаждении рудной минерализации IOCG месторождений.

Парагенетические взаимоотношения минеральных фаз предполагают, что магнетит и апатит выделяются из исходных высокотемпературных магматических гидротермальных флюидов, богатых Fe-P, в среде с более высокой летучестью кислорода. Дальнейшее разбавление этих флюидов привело к образованию низкотемпературных гидротермальных рассолов и способствовало дальнейшему осаждению магнетита и апатита. Позже приток низкотемпературных гидротермальных растворов способствует созданию восстановительной среды для осаждения сульфидов с участием графита и органического углерода.

Наличие магнетита вместе с апатитом вместе с обширными альбититовыми изменениями, присутствием Cu-Au-REE – основные черты ассоциации IOCG-IOA.

Минералого-геохимические характеристики магнетита и апатита интерпретируются с точки зрения их гидротермального, магматического происхождения и генетической связи с оруденением IOCG типа. Исследования EPMA и лазерной абляции ICP-MS (LA-ICP-MS), литологических, минералогических и геохимических признаков магнетита и апатита позволяют сделать вывод о IOCG-IOA типах месторождений. Эти характеристики могут использоваться в качестве петрогенетических индикаторов и ориентиров для поисков.

Оксиды железа являются основным компонентом месторождений (IOCG) и (IOA). Существуют значительные различия в концентрации микроэлементов в магнетите и гематите в зависимости от металлогенической среды во время образования месторождения. Это делает оксиды железа полезными в качестве индикаторных минералов при ГРП.

Минералого-геохимические характеристики циркона позволяют предположить, что циркон также может служить минералого-геохимическим индикатором IOCG месторождений.

### **Минералого-геохимические индикаторы скрытых IOCG месторождений [2, 5].**

В Южной Австралии на IOCG месторождениях Prominent Hill и Carrapateena пост-минерализационный чехол от протерозойских до современных пород обычно превышает 400 м и представляет собой значительный риск и затраты при ГРП, которые обычно состоят из отдельных скважин по геофизическим аномалиям.

Центр исследований высоких технологий (DET CRC) реализовал программу повторного анализа кернов, чтобы выявить характерные геохимические «следы» скрытых залежей IOCG как внутри, так и над фундаментом.

Было проанализировано более 100 скважин общим объемом >2500 проб (рис. 18).

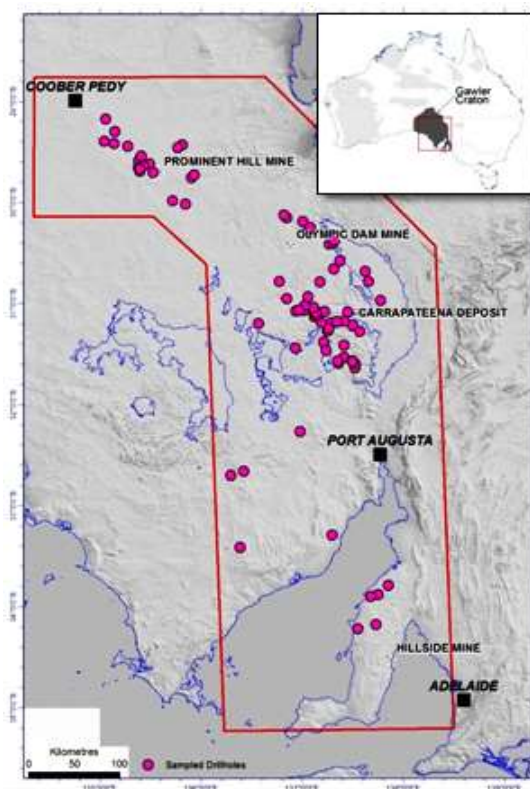


Рис. 18. Расположение скважин, кратон Gawler, Южная Австралия.

*Химические анализы* образцов керна были выполнены с использованием следующих методов:

- Пробирный анализ на свинец на образцах 25 г (ICP-MS) - Au, Pt, Pd
- 4 кислоты (ICP-OES) - Cu, Li, Ni, Pb, S, Zn
- 4 кислоты (ICP-MS) - Ag, As, Bi, Cd, Co, Cs, Ge, In, Mo, Nb, Re, Sb, Se, Te, Tl

- Карбонатный сплав / SIE - F
- сплавление бората лития (ICP-OES) - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, Cr, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, MgO, MnO, Na<sub>2</sub>O, P, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, V
- Синтез бората лития (ICP-MS) - Ba, Be, Ce, Dy, Er, Eu, Ga, Gd, Hf, Ho, La, Lu, Nd, Pr, Rb, Sc, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Th, Tm, U, W, Y, Yb, Zr

*Спектральное сканирование* керна было выполнено с использованием полуавтоматического прибора для гиперспектрального каротажа HyLogger™. Спектры отражения были измерены для керна всех скважин в диапазоне длин волн от видимого, ближнего инфракрасного (400–1100 нм) до коротковолнового инфракрасного (1100–2500 нм). Спектральные данные использовались для интерпретации минералогии с использованием программного пакета Spectral Geologist™ (TSG).

Отбор проб керна сопровождался *измерениями магнитной восприимчивости и удельного веса*. Измерения магнитной восприимчивости (Terraplus KT9) проводились каждые два метра, а измерения удельного веса - примерно каждые три метра. Значения магнитной восприимчивости более 0,05 единиц СИ использовались для индикации присутствия магнитных минералов.

*Классификация гидротермально-метасоматических изменений* горных пород в каждом образце была проведена с использованием комбинации спектральных (HyLogger™), петрофизических и геохимических данных (рис. 19). После классификации были оценены отношения между каждой совокупностью изменений и ключевыми рудоперспективными элементами. Ассоциации гидротермальных изменений, связанные с Cu-Au минерализацией, были установлены путем выявления ассоциаций с сильной взаимосвязью со значениями Cu и Au, во много раз превышающими среднюю распространенность в земной коре (рис. 20). Затем были определены ассоциации дополнительных элементов с этими ассоциациями гидротермальных изменений.

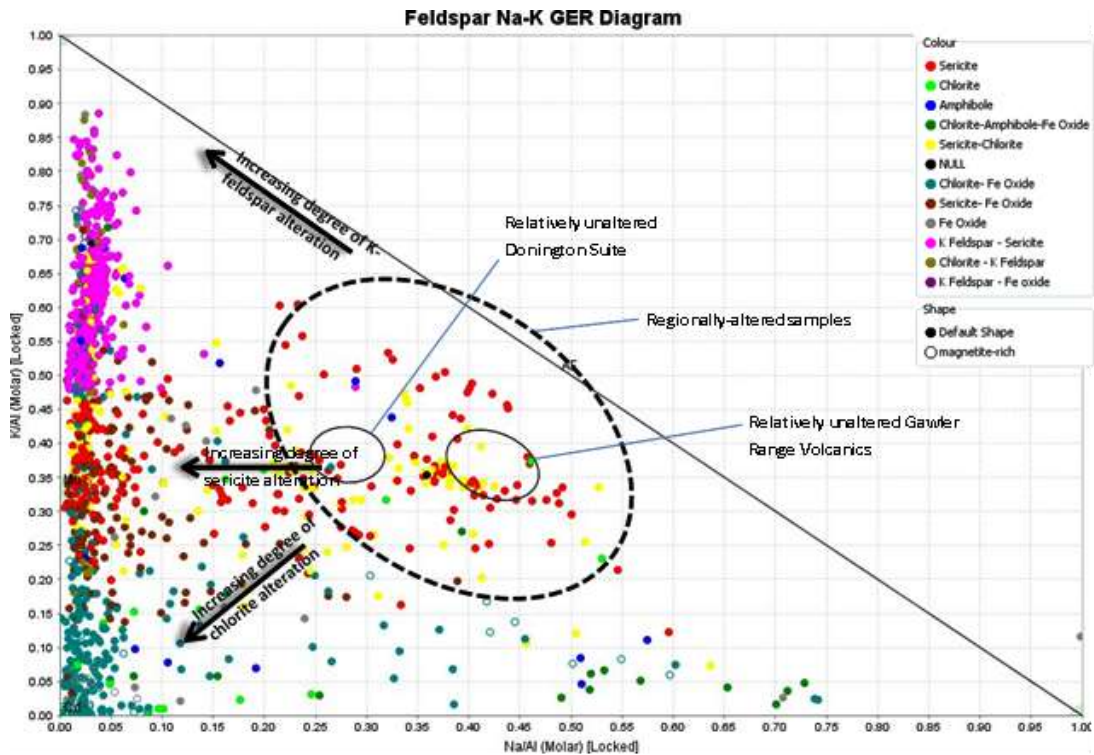


Рис. 19. График зависимости K/Al от Na/Al с использованием молярных соотношений.

Образцы с минимальными изменениями имеют одинаковое содержание натриевого и калиевого полевого шпата и поэтому располагаются в центре диаграммы (помечены как образцы с региональными изменениями). Впоследствии их можно классифицировать как фоновые образцы. Изменения в большинстве образцов характеризуются обеднением Na. Вариации K/Al обычно связаны с изменением калиевого полевого шпата (высокие значения), изменением серицита (умеренные значения) и изменением хлорита и/или оксида железа (низкие значения).

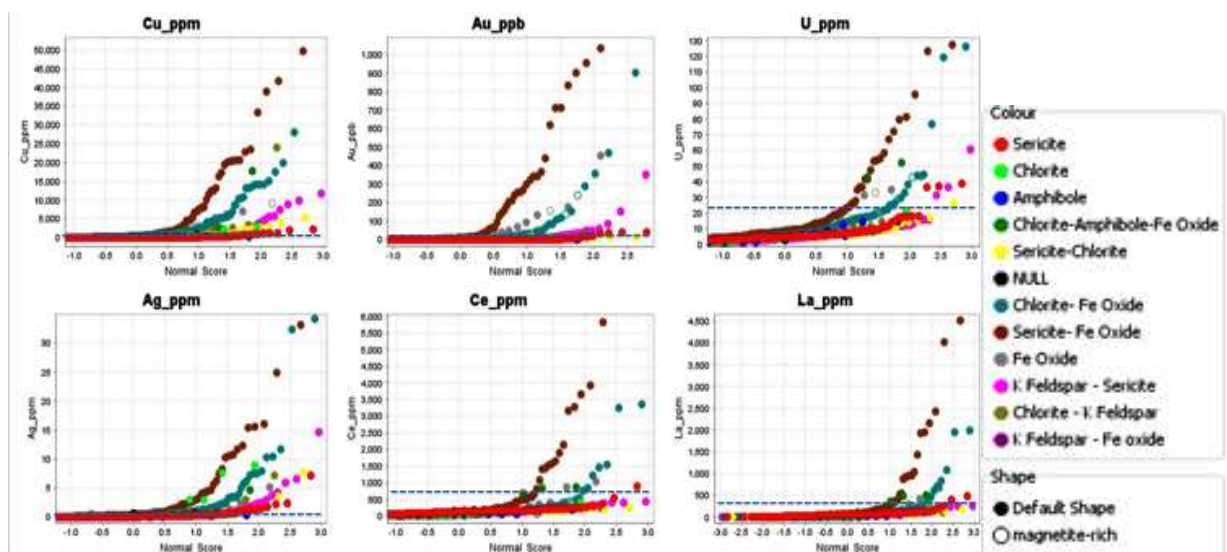


Рис. 20. Графики вероятностей для Cu, Au, U, Ag, Ce и La по отношению к ассоциациям гидротермальных минералов.

Существенные тренды отклоняются от оси абсцисс и других минеральных ассоциаций. Пунктирная линия на каждом графике означает 10-кратное содержание этого элемента в коре.

Связи элементов с каждым из комплексов изменений были исследованы с использованием вероятностных графиков. На вероятностных графиках значения нанесены на N-балл для каждого образца, где  $N = (X - \text{среднее}) / \text{стандартное отклонение}$ . Элементы, обычно связанные с минерализацией IOCG (а именно, Cu, Au, U, Ag, Ce, La), были обогащены ассоциациями изменений серицит-оксид Fe и хлорит-оксид Fe (рис. 20). По сравнению со средним содержанием в земной коре, многие образцы сильно аномальны по этим элементам.

Образцы в этом наборе данных показали сильно аномальные значения для некоторых элементов (рис. 21).

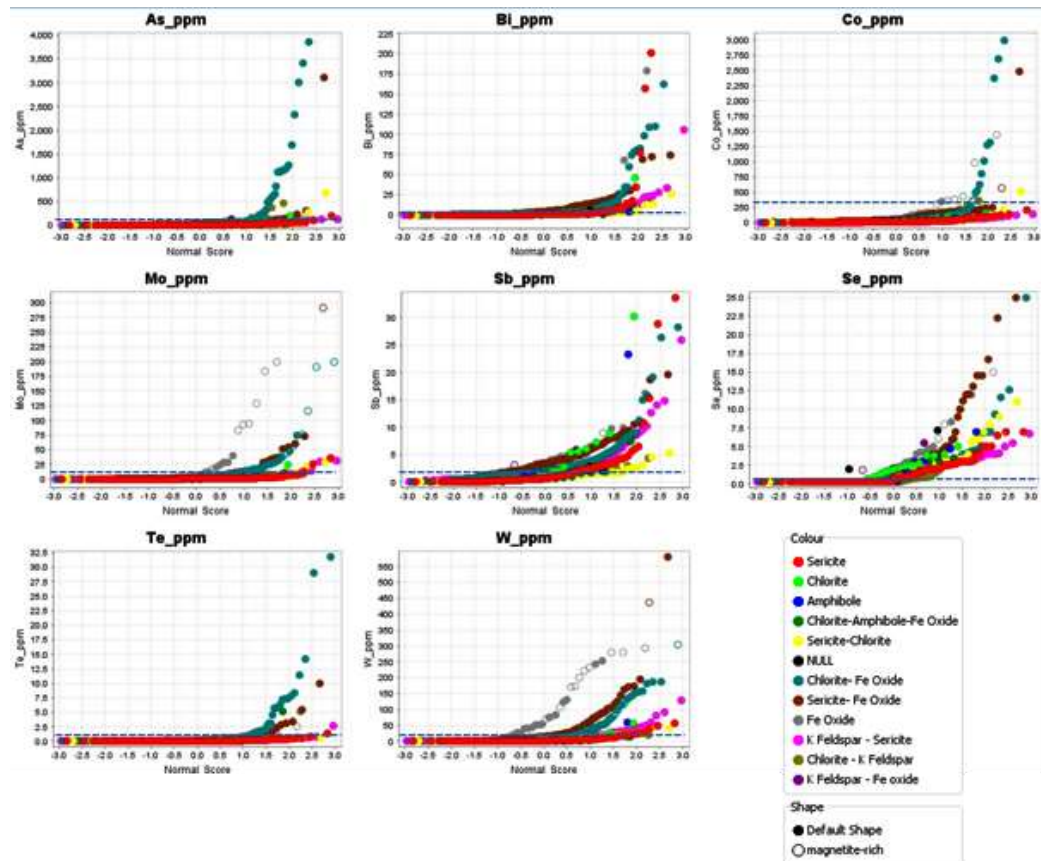


Рис. 21. Графики вероятностей для элементов-индикаторов As, Bi, Co, Mo, Sb, Se, Te и W. Пунктирная линия на каждом графике означает 10-кратное содержание этого элемента в земной коре.

Высокие значения W и Mo чаще всего связаны с минеральными ассоциациями с преобладанием оксида железа (оксид железа, оксид серицита-Fe и оксид хлорит-Fe) и часто с образцами, содержащими магнетит. Сильно аномальные значения As, Co и Te чаще всего связаны с ассоциацией хлорит-Fe-оксидных изменений. Значения, превышающие 10-кратное содержание Sb, Se и Bi в земной коре, были типичными для всех ассоциаций гидротермальных изменений и, следовательно, не были так перспективны как многие другие элементы-индикаторы в наборе данных. Другие элементы с высокими значениями во всех ассоциациях гидротермальных изменений включают Ba, Cu, Ag ± W, S.

В дополнение к установлению взаимосвязи между стилями изменений и аномальностью микроэлементов, коэффициенты корреляции и концентрации элементов, которые во много раз превышали среднее содержание в земной коре использовались для определения

следующего списка элементов, связанных с минерализацией IOCG: Au, Ag, As, Ba, Bi, Cd, Co, Cs, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Re, S, Sb, Se, Sn, Te, Ti, Tl, Tm, U, W, Zn, LREE (Ce, Eu, Gd, La, Pr, Nd, Sc, Sm), HREE (Dy, Er, Ho, Lu, Tb, Y, Yb )

*Региональные геохимические тенденции.*

Пространственное распределение микроэлементов, связанных с минеральными IOCG системами в восточной части кратона Голер, было нанесено на карту в 3D (рис. 22).

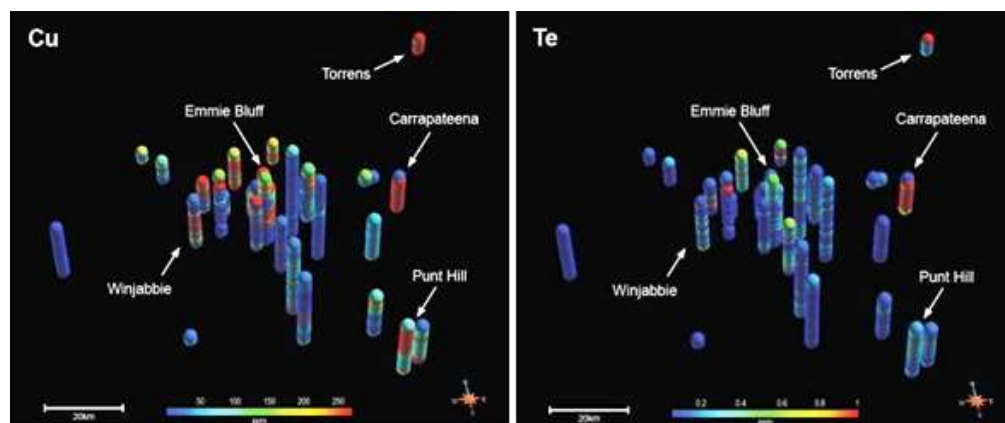


Рис. 22. Трехмерный вид в перспективе значений Cu и Te из проб зерна. Отмечены значительные залежи полезных ископаемых. Высокие значения Te связаны с пересечениями содержания руды.

В системах IOCG с преобладанием гематита ключевые ассоциированные элементы были подразделены на основе их удаленности от оруденения:

- Местный - Ce, La, Te  $\pm$  Co  $\pm$  Cd  $\pm$  Mn
- Умеренный - Au, Ba, Mo, S
- Широкий - Bi, Ag, As, Cu, Fe, Sb, Se, W.

*Индекс перспективности IOCG.*

Распознавание вариации размеров геохимических ореолов для определенных групп микроэлементов, которые связаны с минерализацией Cu в системах IOCG, позволяет получить индекс, который измеряет, сколько ключевых элементов имеют значения выше определенного порогового значения. Этот индекс перспективности IOCG, теперь включенный в программу IoGas v5.2, обеспечивает прогноз с использованием многоэлементных геохимических данных.

Высокие значения элементов, аналогичные пробам фундамента, также были обнаружены в пробах гравия чуть выше границы чехла и фундамента. Хотя геохимические тенденции не были такими последовательными, как для образцов фундамента, использование комбинаций элементов позволило идентифицировать образцы, которые находились близко к оруденению (рис. 23).

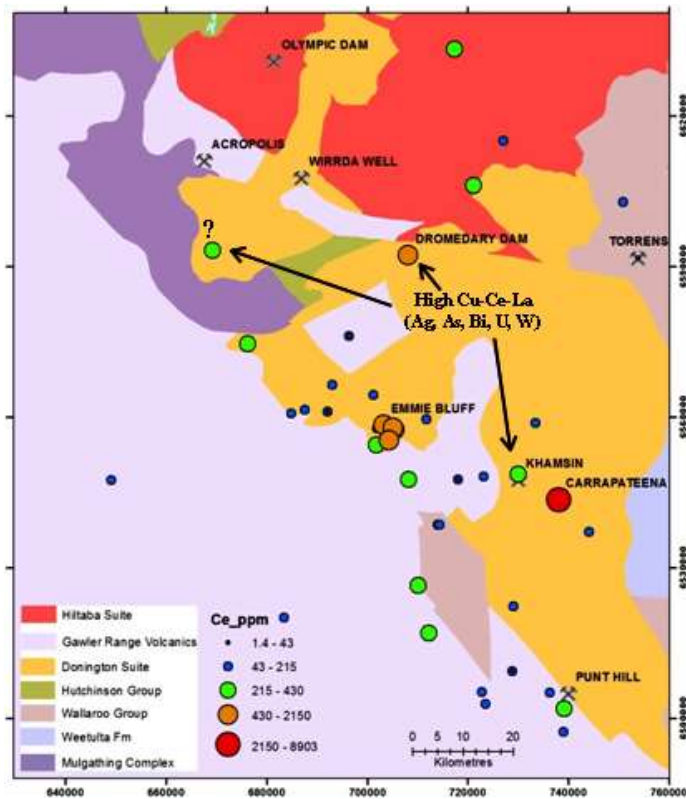


Рис. 23. Значения Ce из базы отбора проб на базовой карте. Высокие значения Ce в сочетании с высокими значениями Cu и La могут использоваться для определения оруденения в фундаменте.

Более 80% территории Южной Австралии покрыто перемещаемым реголитом, и это обычно затрудняет обнаружение залежей руды с поверхности. Исторически геологоразведочные работы в регионе основывались на геофизических методах.

Тщательный анализ перспективных пород фундамента и покрывающих пород показал, что геохимия играет важную роль в процессе геологоразведочных работ и что вокруг залежей IOCG существуют согласованные, широкие ореолы микроэлементов, которые можно использовать для распознавания рудных систем.

Геохимические пробы, собранные на границе осадочного чехла и фундамента, отражают нижележащую минерализацию и представляют собой важный поисковый признак.

Разработанные поисковые критерии успешно проходят апробацию в рамках программы бурения, финансируемой правительством штата, с бюджетом ~ 2 млн долларов в партнерстве с геологоразведочными компаниями и DET CRC.

### **Минералого-геохимические индикаторы уранового потенциала IOCG (Канада) [6]**

На сегодняшний день генетическая модель, происхождение флюидов, процессы переноса, разгрузки металлов, брекчирование, гидротермально-метасоматических изменений вмещающих пород и рудоотложения IOCG(U) месторождений остаются малоизученными. Пробелы в знаниях частично связаны с недавним признанием важности предварительного обогащения для создания богатых ураном объектов, сложности процессов рудообразования и часто скрытый характер многих месторождений IOCG(U).



Магматическая зона Great Bear (GBmz) расположена на западном краю Канадского щита, (рис. 24) и в настоящее время является наиболее перспективным регионом для поисков ЮСГ(U) месторождений под четвертичным ледниковым покровом.

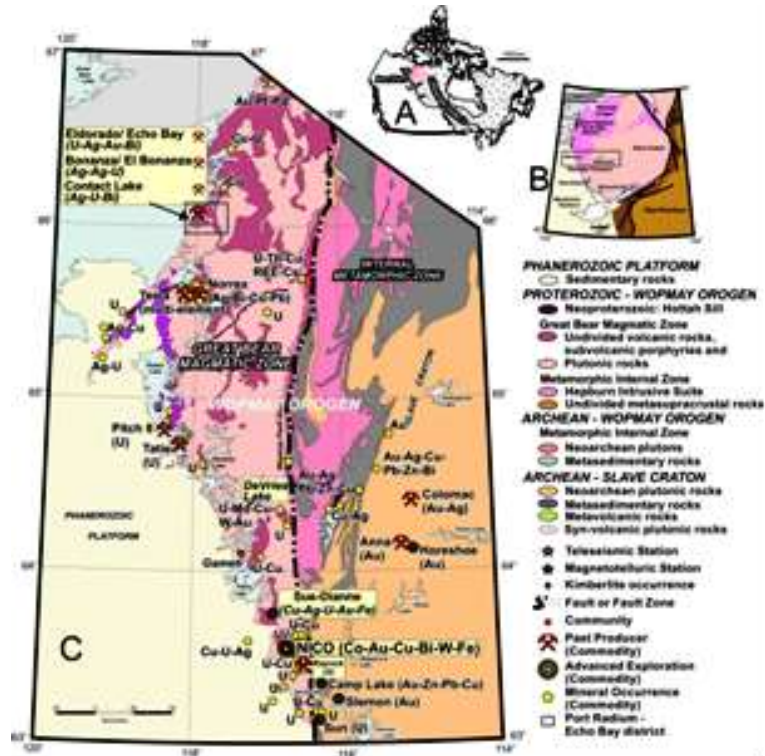


Рис. 24 Схема магматической зоны Great Bear.

GBmz представляет собой вулкано-плутоническую область возрастом 1,88–1,85 млрд лет, интерпретируемую как континентальная магматическая дуга на западной окраине архейского кратона. Она сложена известково-щелочными базальтовыми до риолитовыми комплексами, выполняющими кальдеры, стратовулканы, диатремы, гипабиссальные порфиновые интрузии на древнем метаосадочном фундаменте. Здесь находится месторождение Nico с общими запасами 21,8 млн т при 1,08 г/т Au, 0,16% Bi и 0,13% Co; месторождение Sue-Dianne с ресурсами 17 млн т при содержании меди 0,72%, серебра 2,7 г/т; и районы Port Radium и Echo Bay, где в прошлом было произведено 15 000 000 фунтов  $U_3O_8$  и ~ 32 000 000 унций Ag. Остальная часть этого 450-километрового магматического пояса до сих пор остается слабо опоскованной.

В настоящее время в регионе выполнена серия геологических проектов, включающая геофизические - магнитотеллурические, телесеismicические и аэромагнитные исследования, а также геохронологические (U-Pb), геохимические и индикаторно-изотопные исследования коренных пород и их гидротермально-метасоматических изменений, целью которых является раскрытие тектонической эволюции района и выявление ключевых особенностей рудоформирующих процессов.

Комплекс андезитовых стратовулканов в районе Port Radium и Echo Bay содержит зонированные гидротермально-метасоматические изменения пород, которые можно отнести как к системам IOCG, так и к порфировым и эпитеpmальным системам.

Потенциальными индикаторными минералами для поисков признаков IOCG(U) месторождений, под четвертичным ледниковым покровом могут служить: оксиды (гематит, магнетит, рутил, шпинель, уранинит), силикаты (алланит, амфибол, эпидот, гранат, титанит, турмалин, везувианит, циркон), фосфаты (апатит, монацит, ксенотим) и сульфиды (висмутинит, кобальтит). Для оксидов железа (магнетита и гематита) из различных сред был разработан эффективный электронный микрозондовый аналитический метод, который позволяет проводить анализ оксидов железа. Дискриминантные диаграммы, такие как  $Ti/V$  против  $Ti$  или  $(Ni+Ca)/(Cr+Mn)$  против  $Ti/V$ , эффективны, чтобы отличить оксиды железа, образованные в IOCG(U) месторождениях от оксидов, образованных в порфировых и других месторождениях. Аналогичные индикаторные свойства проявляет и циркон.

Был проведен отбор проб и детальный химический анализ на эталонных объектах оруденения, вмещающих пород и зон изменений, чтобы типизировать их минеральные характеристики и предоставить фоновые данные, которые используются для идентификации и характеристики индикаторных минералов, извлеченных из проб, собранных на поисковых участках для определения наиболее перспективных.

Для геохимического профилирования по типам гидротермальных изменений был использован сканер керна ITRAX™ (ультрасовременный XRF-прибор, обеспечивающий оптическое, радиографическое и химическое картирование в масштабе от миллиметра до микрометра основных следов редкоземельных элементов (REE), платиновой группы (PGE) и поля высокой напряженности (HFSE). Были получены профили химической концентрации через каждые 500 микрон с 30 секундным временем анализа, охватывающие зоны гидротермальных изменений районов Port Radium, Echo Bay и также месторождения Nico. К проанализированным элементам относятся Si, S, Cl, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Cu, Se, Rb, Sr, Zr и Y. Отдельные анализы подтвердили присутствие Au, Pt, Bi и U, где профили показывают значительные пики. Напротив, Ni, Cr, V, As, Ba, Hg, Pb слабо отличаются от фона. Продолжается совершенствование методики повторной обработки для повышения способности анализировать U. Интегрированный с полевыми соотношениями, пространственно детализированный геохимический «отпечаток» через гидротермальные изменения обеспечит средства отслеживания химической эволюции многих обнаруживаемых элементов, вовлеченных в системы IOCG(U). Знание того, когда и где в системе появляются значительные количества Cu, Au, U, PGE и других металлов, расширит возможности по уточнению моделей IOCG(U) месторождений и их поисковых критериев и признаков.

*Гиперспектральные признаки зон изменений* (отражательные способности) проводились в диапазоне 400-2500 нм с помощью радиометра Analytical Spectral Devices при номинальном спектральном разрешении 3 нм при 700 нм, 10 нм при 1500 и 2100 нм. Спектры каждого типа изменений имеют общие характеристики поглощения, что позволяет предположить, что каждый тип имеет уникальную сигнатуру. Калиевые и натриевые изменения демонстрируют схожие общие профили, но их можно различить на основе расположения гидроксильных элементов (ОН-) около 2200 нм. Использование аэро- и космических гиперспектральных материалов при достаточном пространственном разрешении дает возможность удаленного картирования поверхностных минералов, использования распределения типов изменений в качестве поисковых признаков.

Схема использования гидротермально-метасоматических изменений в поисковых целях показана на рисунке 25.

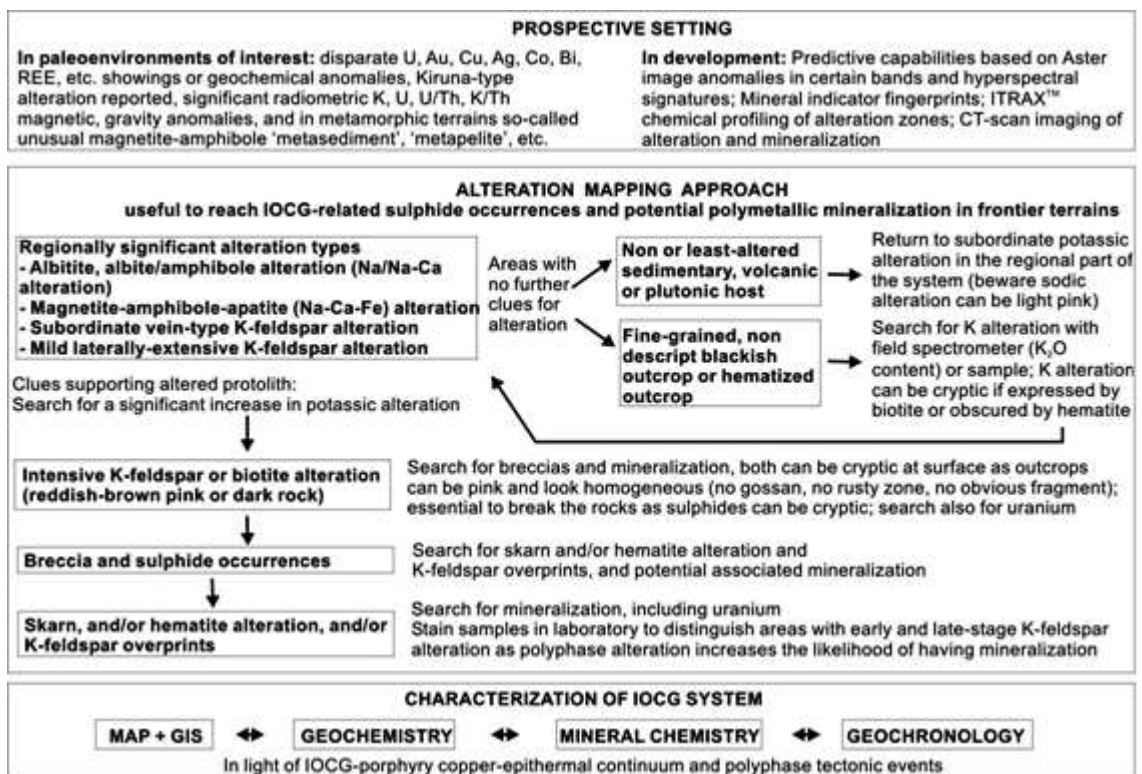


Рис. 25: Схема использования гидротермально-метасоматических изменений.

В региональном масштабе зоны натриевых и калиевых и кальциево-железистых изменений (включая альбититы) развиваются дистальнее оруденения и наиболее близко к связанным с ними интрузивным источникам тепла. Некоторые из них также развиваются вдоль зон разломов. Распространенным наложением является второстепенное калиевое изменение или умеренное замещение калиевого типа. Там, где изменение калиевого полевого шпата (или биотита) становится интенсивным (сначала с магнетитом и амфиболом), обычно следует брекчирование и обогащение сульфидами. Такое интенсивное изменение калия, как правило, является периферическим по сравнению с предыдущим изменением. Местами скарновидные известково-силикатные изменения могут перекрывать ранние калиевые

изменения и связаны с несколькими вариациями магмато-гидротермальной минерализации. Изменение гематита происходит на поздней стадии, оно может быть повсеместным, вкрапленным или прожилковым. Типы изменений, связанные с ураном, характеризуются дистальными зонами гематита и/или кварц-карбонат-гематит±богатые калием.

Таким образом, в GBmz гидротермально-метасоматические изменения, связанные с IOCG(U) месторождениями, могут быть выявлены путем геохимического профилирования (в сочетании с анализом данных по тиллам) и гиперспектрального анализа с использованием эталонных баз данных, а также выявленных геохимических критериев.

## 4. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

**Магнитное и гравитационное моделирование IOCG месторождений (Австралия) [9, 10]).**

IOCG месторождения являются важным источником наиболее ценных полезных ископаемых: железо, золото, медь и уран. В Австралии расположены две основные провинции IOCG, Mount Isa Block и кратон Gawler (рис. 26).

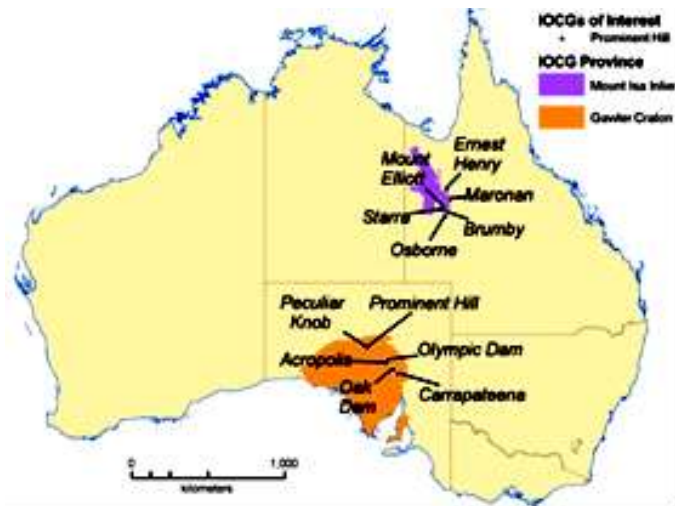


Рис. 26. Схема расположения IOCG провинций и основных месторождений.

Геофизические характеристики IOCG сильно различаются, особенно магнитные и гравитационные. Например, месторождение Olympic Dam создает огромную гравитационную аномалию 17 мГал, но магнитную аномалию только 1000 нТл, в то время как м-ние Ernest Henry создает аномалию силы тяжести  $\sim 2$  мГал и магнитную аномалию 7000 нТл. Большинство IOCG были первоначально обнаружены с помощью региональных магнитных и гравитационных аномалий. Однако, мало геофизических исследований в масштабе месторождения.

Гравитационное и магнитное выражение IOCG месторождений считается основным критерием при поиске этих рудных систем. По мере того, как качество данных улучшается, а методы обработки развиваются, появляется возможность повысить полезность гравиметрических и магнитных данных для дальнейшего понимания геофизических характеристик этих месторождений. Векторизация данных остаточной силы тяжести и приведенной к полюсам общей магнитной напряженности (RTP-TMI) генерирует отображаемые критерии, которые позволяют количественно определять градиенты аномалий. Последующее применение пространственной статистики позволяет отображать пространственную кластеризацию аномалий большой величины. Распределение пространственных кластеров дает представление о геологических структурах, вмещающих IOCG месторождения.

Основное внимание уделяется магнитным и гравитационным аномалиям, оценивается их изменчивость в зависимости от пяти основных физических характеристик: размер; глубина залегания; содержание магнетита и гематита; коэффициент Кенигсбергера (т.е. индуцированная: остаточная намагниченность). Результаты являются основой для формирования геофизических поисковых критериев IOCG объектов в провинциях Mount Isa Block и кратон Gawler.

Гравитационные и магнитные аномалии для девяти IOCG месторождений из Mount Isa Block и кратона Gawler показаны в 3D на рис. 27.

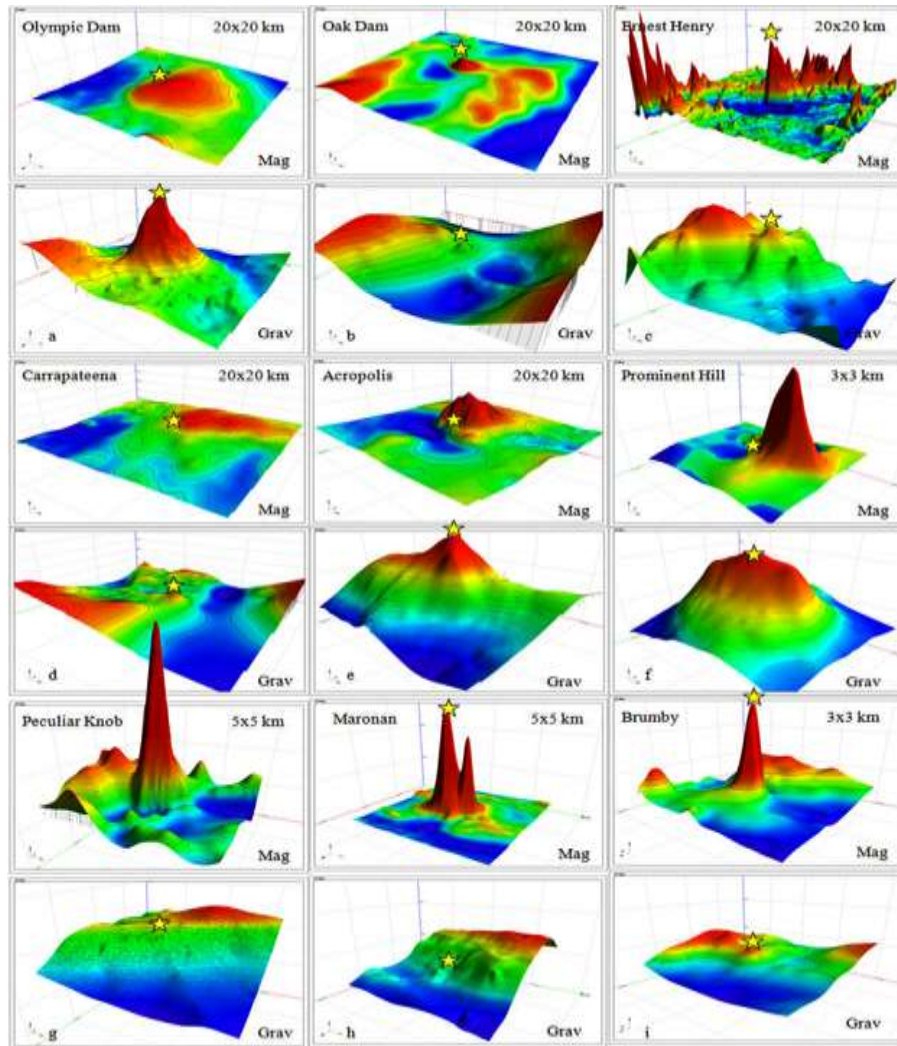


Рис. 27. 3D изображения аномалий общей магнитной интенсивности (вверху) и силы тяжести Буге (внизу). Для сетки 20x20 км (a-e) аномалии силы тяжести имеет вертикальное преувеличение 500 относительно ТМІ. Сетки 5x5 км (g, h) - 200, сетки 3x3 км (f, i) - 100.

Прямое магнитное и/или гравитационное моделирование и трехмерная инверсия выполнена с использованием Model Vision ProTM. Результаты моделирования используются для оценки глубины залегания, Fe%, соотношения гематит/магнетит.

IOCG месторождения в кратоне Gawler часто связаны с гравитационными аномалиями (до 20 мГал), вызванными большими объемами гематитовой брекчии. Они также связаны с магнитными аномалиями (Olympic Dam, Prominent Hill, Carrapateena). Эти аномалии могут не совпадать по глубине до источника (z), например, Olympic Dam, или по координатам

поверхности (x, y), например, Prominent Hill (рис. 28a). Они вызваны магматическими интрузиями, богатыми магнетитом (Prominent Hill) или син-пост-генетическими мафическими дайками.

IOCG в Mount Isa Block, как правило, связаны с большими магнитными (7000 нТл Ernest Henry) и гравитационными аномалиями, которые можно смоделировать как вызванные одним и тем же источником, например, Brumby (рис. 28b). и Ernest Henry (рис. 28c).

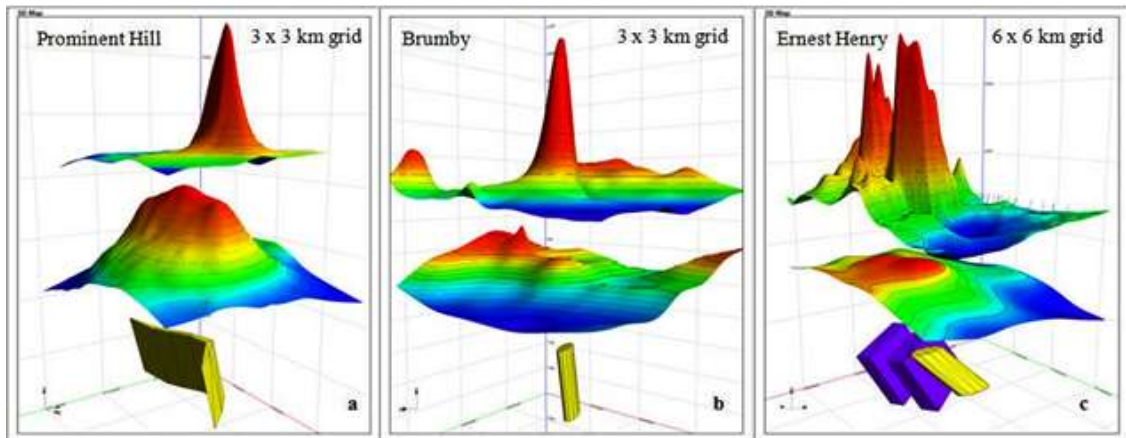


Рис. 28. Прямое моделирование и инверсия трехмерных тел для Prominent Hill, Brumby и Ernest Henry.

На Prominent Hill (рис. 28a) субтабличное тело с плотностью  $3,2 \text{ г/см}^3$  и незначительной магнитной восприимчивостью объясняет аномалию силы тяжести (внизу), тогда как магнитная аномалия (вверху), связана с магнетитовым скарном. В Brumby (рис. 28b) совпадающие магнитные и гравитационные аномалии могут быть смоделированы с помощью трубы с плотностью  $3,8 \text{ г/см}^3$  и магнитной восприимчивостью  $0,7 \text{ СИ}$ . В Ernest Henry (рис. 28c) совпадающие магнитные и гравитационные аномалии моделируются как рудная труба (желтая) с плотностью  $3,4 \text{ г/см}^3$  и магнитной восприимчивостью  $1,35 \text{ СИ}$ , но большая часть аномалии связана с неминерализованными табличными формами (фиолетовые тела), которые представляют собой магнетитсодержащие зоны.

В большинстве случаев IOCG из обоих регионов, как правило, имеют либо субтабличную архитектуру, например, Olympic Dam, Prominent Hill (рис. 28a), что согласуется с гидротермальной брекчией систем разломов; или цилиндрическая архитектура, например, Brumby, Ernest Henry, Oak Dam, которая согласуется с гидротермальными трубками брекчий на пересечениях разломов. Другой особенностью многих IOCG является расположение на периферии глубоких, длинноволновых магнитных аномалий (Olympic Dam, Carrapateena, Oak Dam, Ernest Henry, Maronan, Brumby, Eloise), вызванных магматическими очагами, которые могли обеспечить теплом, серой и/или металлами рудную систему. Некоторое базовое моделирование Olympic Dam (рис. 29a) предполагает, что возможный глубинный источник может иметь восприимчивость, приближающуюся к  $1 \text{ СИ}$ , что может означать присутствие богатого магнетитом тела, возможно, неокисленной брекчии.

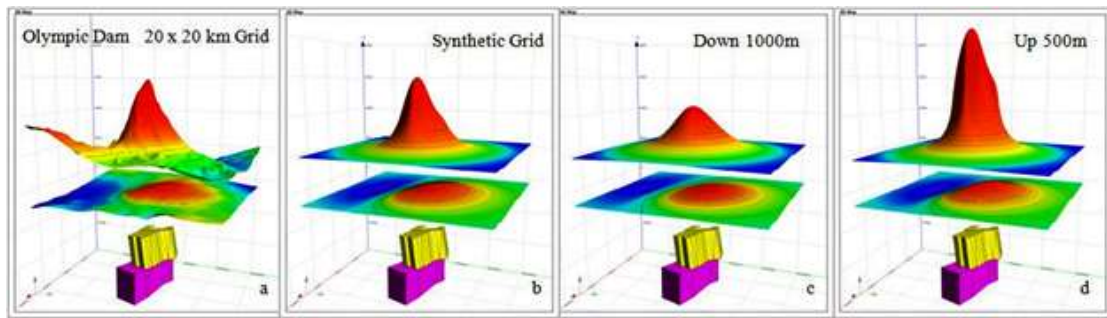


Рис. 29. Прямое моделирование и инверсия магнитных (нижняя) и гравитационных (верхняя) аномалий над Olympic Dam.

На рис. 29а. Желтое тело очень плотное, но с низкой магнитной восприимчивостью (например, гематит), в то время как пурпурное тело имеет умеренную плотность и высокую восприимчивость (например, вкрапленный магнетит). Синтетические сетки были рассчитаны на основе тел, как показано на рис. 29b. Чтобы проиллюстрировать полезность данных гравитации для обнаружения IOCG, сетки были пересчитаны после того, как тела были перемещены на 1000 м (рис. 29c) и вверх на 500 м (рис. 29d).

Экспериментальные результаты дают представление о некоторых геофизических критериях, которые могут быть применены при поисках IOCG. Изменение глубины упрощенной модели Olympic Dam (рис. 29b-c), показывает, что магнитная и особенно гравитационная характеристики остаются надежными инструментами обнаружения крупных залежей с преобладанием гематита, независимо от глубины залегания. По мере того, как объекты становятся меньше, магнитные и гравитационные признаки с глубиной слабеют. Например, если переместить Brumby всего на 300 м глубже, она была бы почти невидимой для гравитации и магнетизма, несмотря на магнитную восприимчивость 0,7 СИ и плотность  $3,8 \text{ г/см}^3$ . Если бы Ernest Henry был всего на 300 м глубже (рис. 30b), его можно было бы (геофизически) принять за вторжение интрузии основного состава. Если удалить два пластинчатых тела (рис. 30c) или уменьшить процент магнетита вдвое (рис. 30d), он может быть почти невидимым.

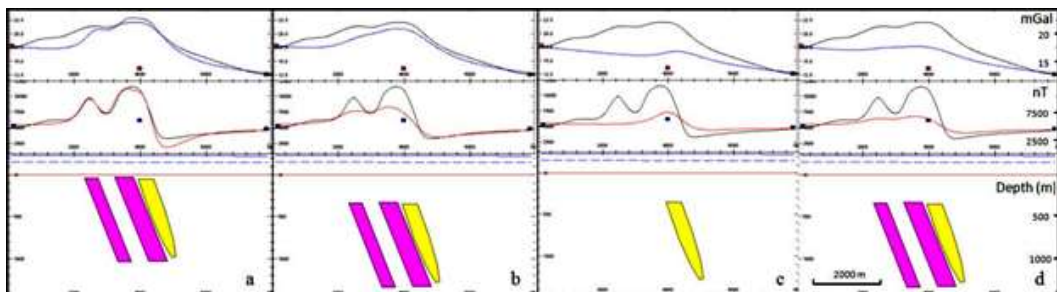


Рис. 30. 3D модель месторождения Ernest Henry (см. Рис. 3c).

#### *Векторизация данных остаточной гравитации и магнитной напряженности.*

Гравиметрические данные кратона Gawler представляют собой наземные значения силы тяжести Буге с поправкой на рельеф местности с поправочной плотностью  $2,67 \text{ г/см}^3$  (рис. 31).



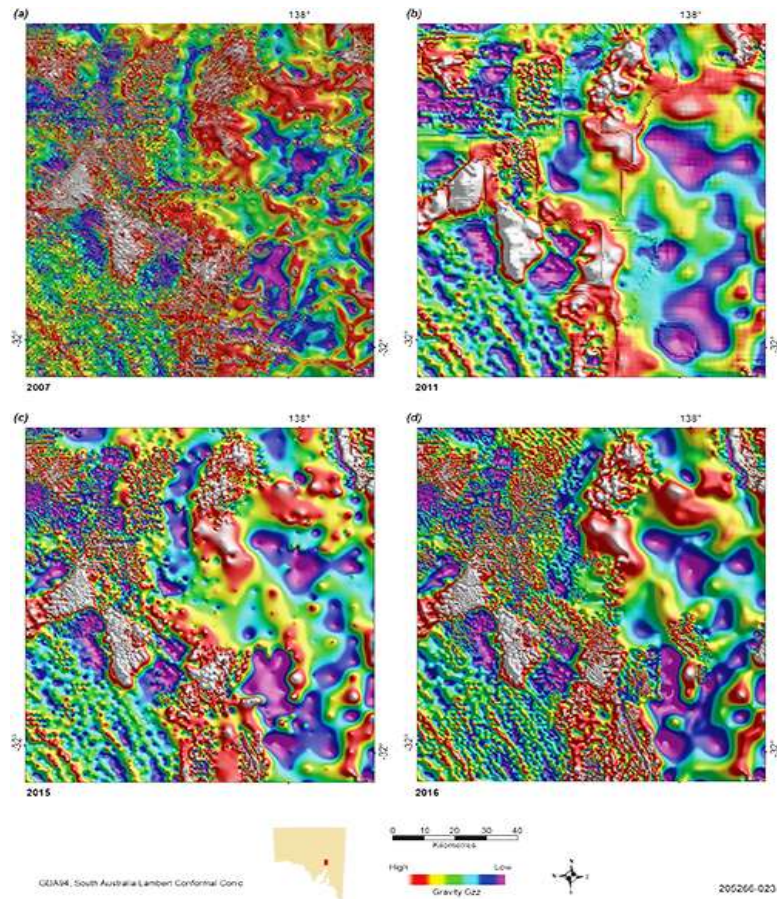


Рис. 31 Эволюция региональной гравиметрической съемки Южной Австралии

Методология контролируемой переменной плотности (рис. 31d) позволила создать карту, которая практически не содержит ошибок привязки и поддерживает последующую фильтрацию вертикального градиента (1VD) или остаточное преобразование. Фундаментальной целью 1VD или остаточного преобразования данных гравитации и ТМІ является получение версии изображения, которая поддается интерпретации и анализу приповерхностного слоя, посредством ослабления более глубоких источников, которые могут маскировать высокочастотные приповерхностные слои. Остаточные фильтры и фильтры 1VD усиливают акцент на вариации потенциального поля из-за неглубоких контрастов измеряемых характеристик и улучшенного горизонтального разрешения соседних, перекрывающихся элементов. Преобразование 1VD оптимизирует отображение неглубоких источников, но представляет трудности при количественном анализе или сравнении величин аномалий. На рисунке 32 показано гравитационное поле Буге в сравнении с остаточным и 1VD месторождения Carrapateena. Рисунок 33 иллюстрирует те же особенности с использованием поля RTP-ТМІ.

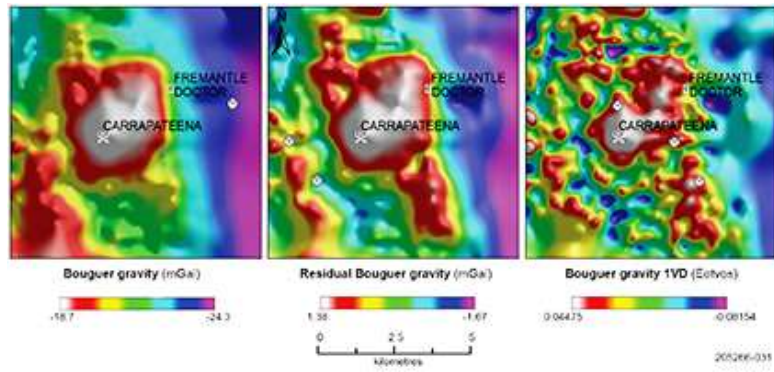


Рис. 32 (а)-Гравитационное поле Буге, (б)-Остаточное гравитационное поле Буге подчеркивает приповерхностные особенности, (с)-1VD гравитационного поля Буг еще больше подчеркивает приповерхностные особенности.

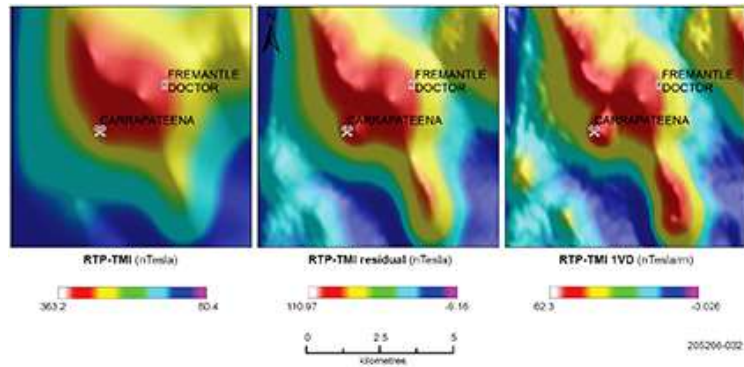


Рис. 33 (а)-Изображение RTP-TMI, (б)-Остаточное изображение TMI подчеркивает приповерхностные особенности. (с)-1VD сетки RTP-TMI дополнительно подчеркивает приповерхностные особенности.

На рисунке 34 показаны остаточная сила тяжести и выражение TMI шести IOCG месторождений в провинции Олимпик.

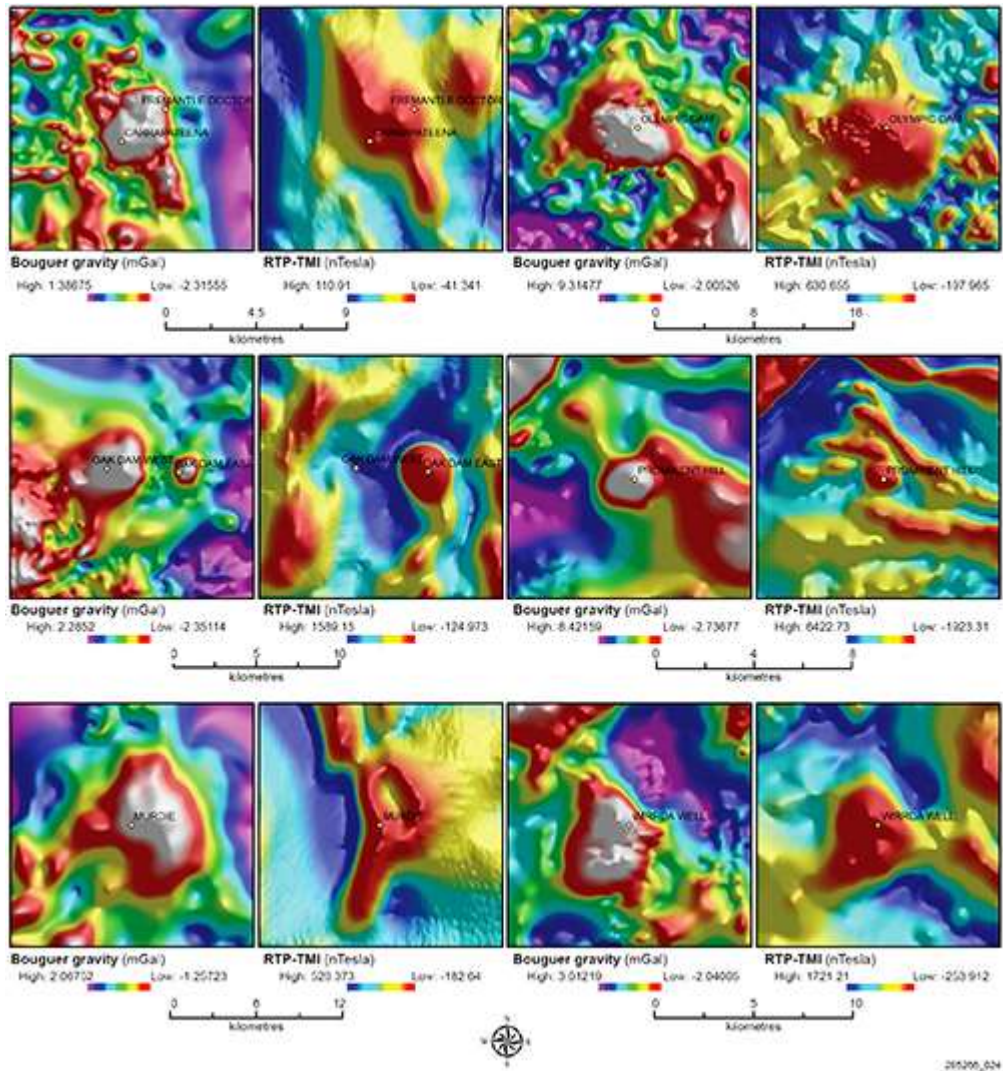


Рис. 34 Остаточная гравитация и остаточные выражения RTP-TMI шести IOCG месторождений.

Векторизация данных гравитации и TMI кратона Голера показаны на рисунке 35. Она основана на двухэтапном процессе построения контуров каждой сетки и последующего выбора положительных аномалий с верхним пределом, установленным на длине периметра аномалии. Величина аномалии рассчитывалась путем вычитания значения периметра аномалии из максимума. Они могут использоваться в качестве вспомогательных средств для интерпретации, в качестве входных данных в операциях наложения ГИС, в качестве отображаемых критериев при моделировании минерального потенциала или для анализа с использованием пространственной статистики.

На рисунке 36 показан результат геобработки, используемых для определения аномалий силы тяжести и RTP-TMI в пределах пространственного разноса не более 1000 м. Удаление несовпадающих аномалий сокращает пространство поиска IOCG с 10 259 гравитационных и 39 047 магнитных элементов до 8 510 гравитационных и 20 345 магнитных элементов. Полигоны аномалии на рисунке 36 окрашены в соответствии с величиной объекта, а более темные оттенки представляют объекты с более высокой величиной. Анализ пространственного наложения известных проявлений IOCG показывает, что 62,5% находятся

в пределах сильномагнитных объектов, 51,9% находятся в пределах объектов высокой гравитации, но 96,2% находятся в пределах 1000 м от магнитной аномалии, имеющей связанную гравитацию. аномалия (в пределах 1000 м). Основываясь на этой статистике, совпадающие магнитные и гравитационные характеристики в пределах 1000 м друг от друга считаются надежным признаком большинства ЮСГ месторождений.

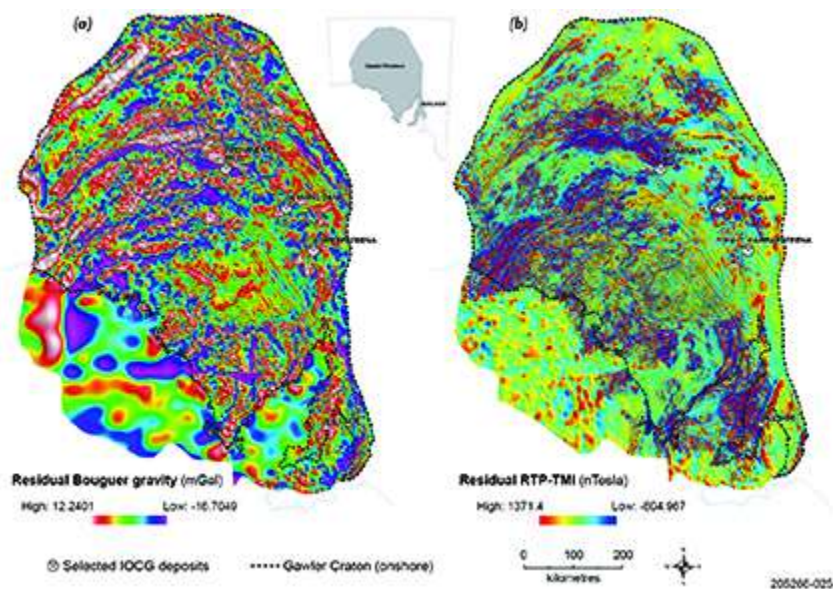


Рис. 35 Карты остаточной гравитации Буге (а) и остаточного RTP-TMI (б), привязанные к границе кратона Голера, в качестве входных данных в процесс векторизации.

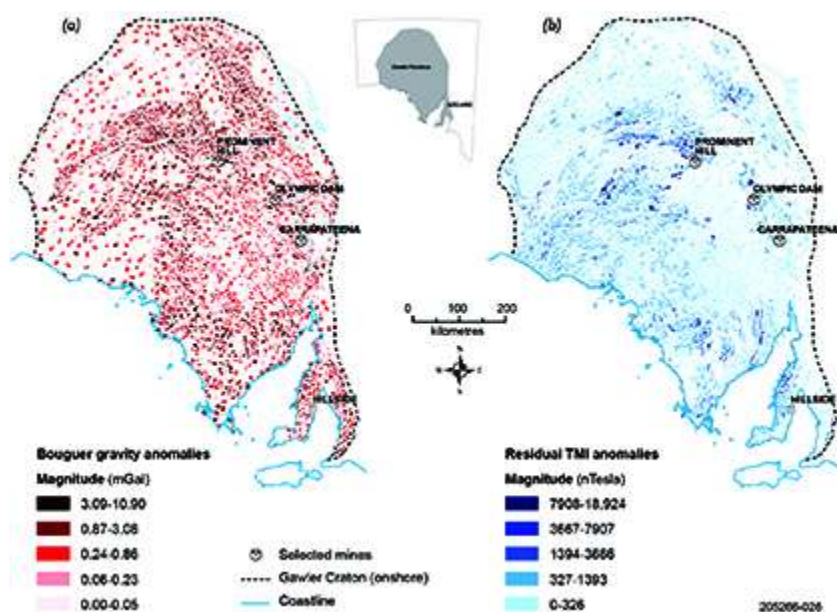


Рис. 36 Пространственно совпадающие аномалии остаточной гравитации (а) и RTP-TMI (б) кратона Голера. Эти совокупности аномалий готовы к количественному анализу или в качестве критериев для моделирования минерального потенциала.

Поисковый интерес представляет распределение аномалий силы тяжести высокой магнитуды и, в меньшей степени, аномалий RTP-TMI. Аномалии силы тяжести большой величины характерны почти для каждого месторождения ЮСГ в Южной Австралии. Аномалии TMI высокой магнитуды характерны для всех месторождений железа в

Южной Австралии, а аномалии ТМІ средней величины обычно присутствуют на участках со значительной минерализацией IOCG.

Метод пространственной статистики был применен к наборам данных гравитации и аномалий ТМІ, чтобы проверить, есть ли доказательства пространственной кластеризации гравитации и аномалий ТМІ. Анализ показал, что пространственное распределение аномалий явно контролируется геологическими процессами, и можно их интерпретировать в контексте потенциальной связи с оруденением IOCG. Инструмент для картирования пространственной кластеризации - Anselin Local Morans I, входящий в программный пакет Arc GIS TM. Для аномалий остаточной силы тяжести и ТМІ, используемых в этом анализе, порог составляет 0,4 мГал для объекта большой силы тяжести и 136 нТесла для объекта ТМІ большой величины. На рис. 37 показаны скопления аномалий остаточной гравитации и RTP-ТМІ кратона Голера.

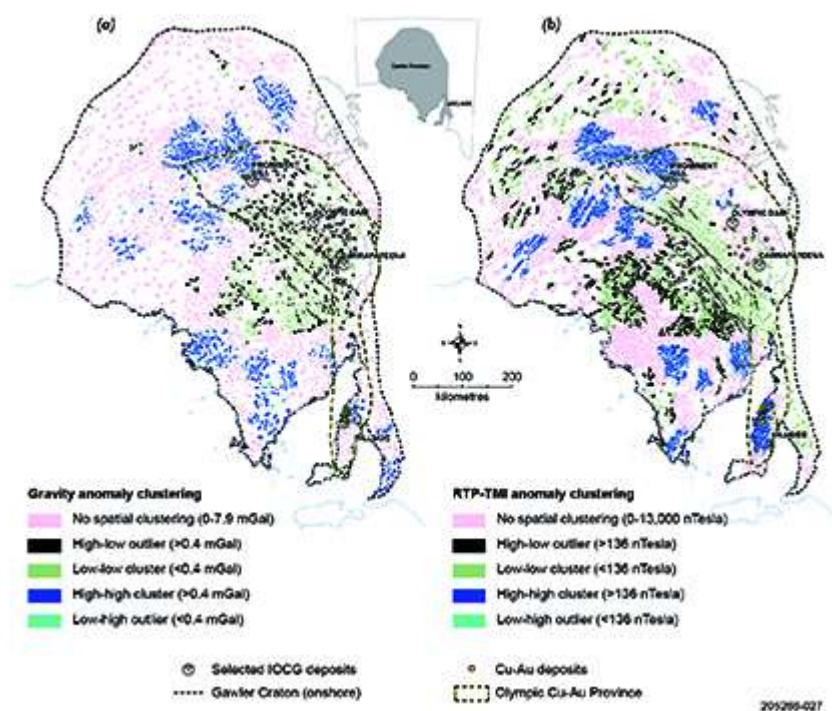


Рис. 37 Гравитационные (а) и RTP-ТМІ (б) аномалии кратона Голера. Статистически полученный порог силы тяжести для объекта остаточной силы тяжести большой величины составляет 0,4 мГал, а для объекта остаточной магнитной силы большой величины - 136 нТесла.

Изображения на рисунке 37 демонстрируют общее совпадение расположения высоких аномалий по всему кратону Голера, указывая на то, что зоны аномалий с высокой плотностью (темно-синий) имеют аналогичное распределение как и высокомагнитные аномалии. Высокие выбросы (черные) на гравиметрическом изображении расположены внутри и рядом с центральной частью провинции. Магнитные элементы соответствуют этим гравитационным выбросам и являются либо низкими скоплениями, либо не имеют группирования. Там, где высокие выбросы силы тяжести простираются через вулканическую провинцию хребта Гавлер, магнитные элементы также являются высокими выбросами, в целом совпадающими с величиной этих элементов гравитации.

На рисунке 38 показаны типы кластеров со всеми удаленными аномалиями ниже порога высокой магнитуды и показано значительное количество аномалий выше порога, соседствующих с высокими кластерами и высокими выбросами. Эти дополнительные крупномасштабные объекты представляют поисковый интерес.

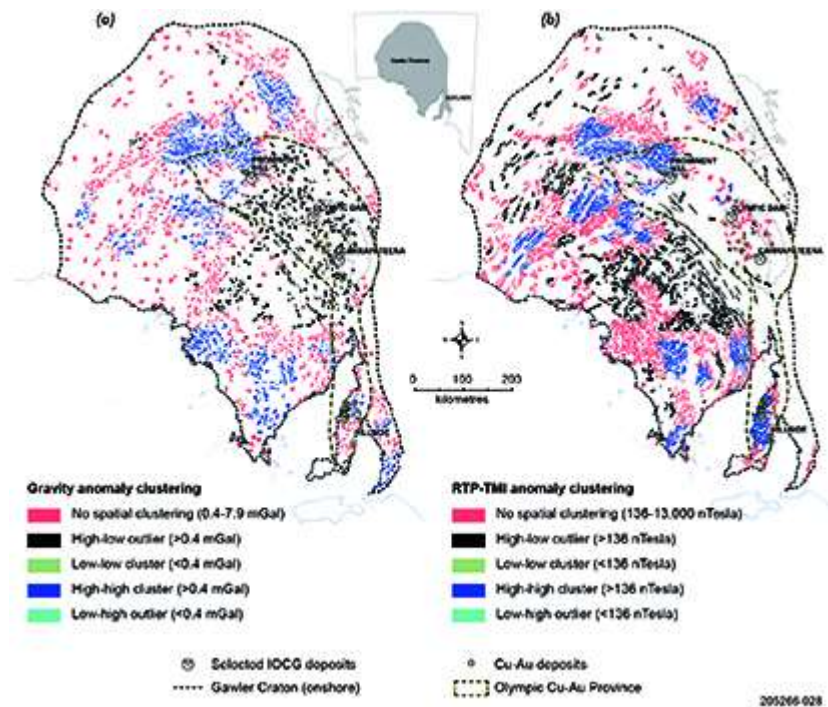


Рис. 38 Кластеры аномалий остаточной гравитации (а) и ТМІ(б), отображающие только те аномалии, которые превышают статистический порог, полученный в результате анализа кластеров и выбросов.

На рисунке 39 показаны три месторождения IOCG в контексте полигонов кластеров аномалий и приведен пример каждого из трех геологических террейнов, рассмотренных ранее. Векторизованные геофизические данные позволяют улучшить интерпретацию только изображений, фиксируя величину аномалии и тип кластеризации, показывая пространственное совпадение между перекрывающимися гравитационными аномалиями и аномалиями ТМІ. Контуры аномалий предоставляют дополнительную информацию в областях аномалий, позволяя визуализировать возмущения потенциального поля внутри отдельных аномалий.

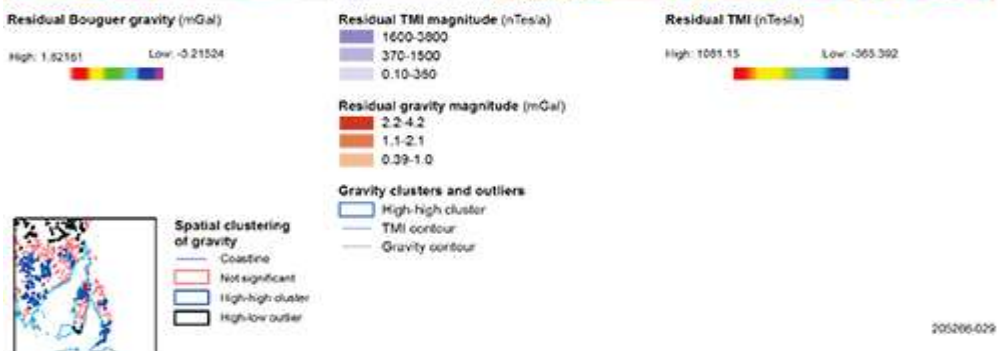
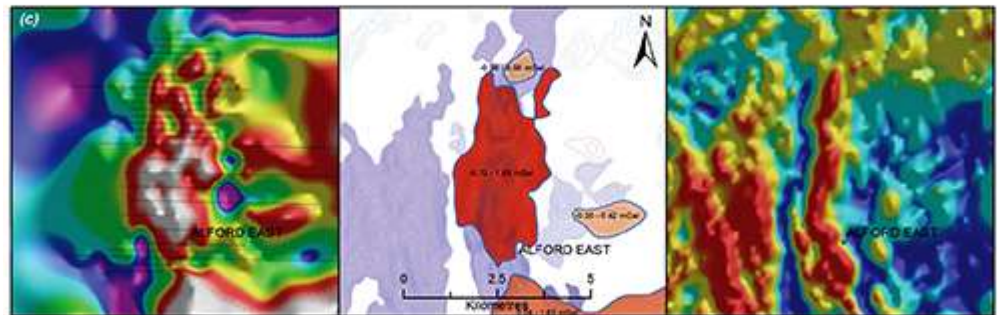
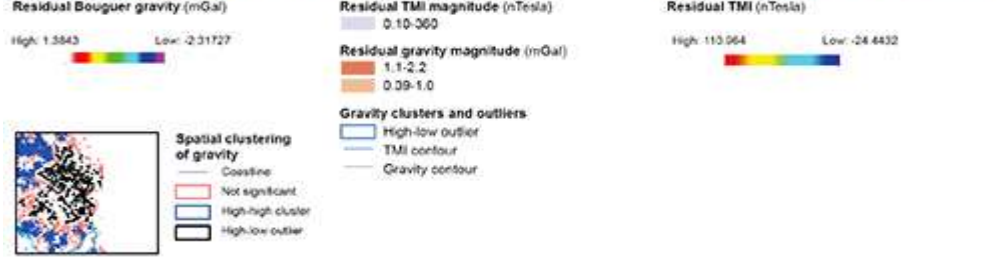
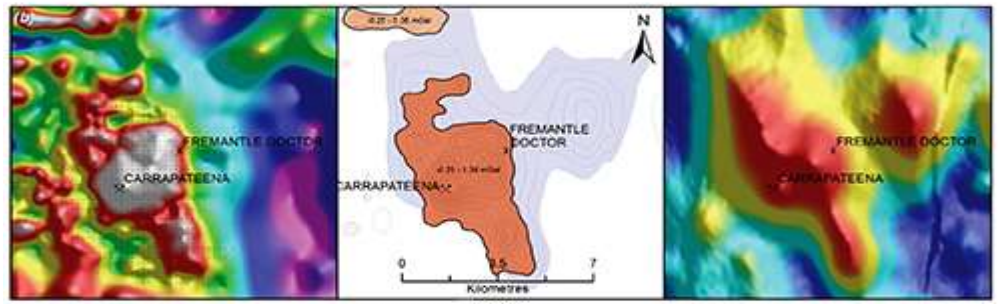
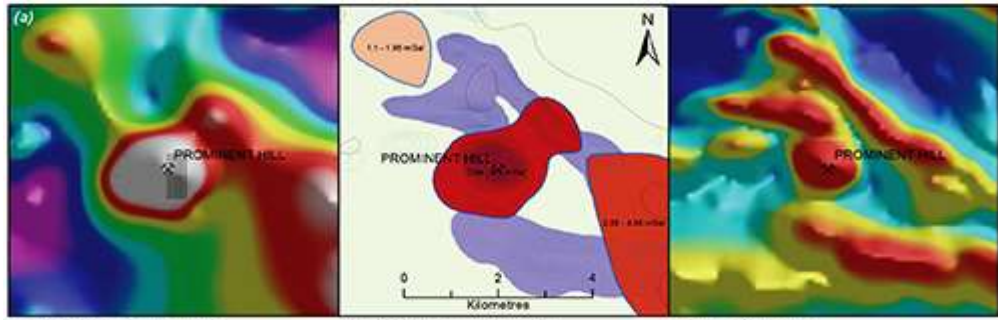


Рис. 39 Остаточная гравитация и остаточные изображения RTP-ТМІ, отображаемые с результатами кластерного анализа и анализа выбросов.

В целом, результаты моделирования согласуются с текущим геологическим представлением о том, что IOCG возникают в зонах разломов и/или брекчий.

Для поисков IOCG гравиметрические данные с высоким разрешением (расстояние <1 км) являются более надежным инструментом чем магнитные, поскольку они не подвержены экспоненциальному затуханию с увеличением глубины источника, особенно в случаях маломощного оруденения.

IOCG месторождения обычно связаны с частично совпадающими гравитационными и магнитными аномалиями. Классификация аномалий по величине и типу пространственной кластеризации помогает выявить те из них, которые с большей вероятностью связаны с оруденением, что значительно сужает пространство поиска.

Кроме того, пространственная кластеризация гравитационных аномалий и аномалий ТМІ выделяет непоискованные перспективные области аналогичного геофизического характера с большим количеством неисследованных аномалий силы тяжести большой величины с совпадающими характеристиками ТМІ.

### Геофизические критерии IOCG месторождений (Швеция) [3].

Быстрое развитие мощной электронной аппаратуры увеличило возможности сложных статистических вычислений, геостатистических алгоритмов и процессов пространственного анализа, в том числе с использованием алгоритмов «нечеткой логики» в поисковых целях. В тоже время компьютерные поисковые методы нуждаются в больших и точных наборах геологических, геофизических, петрофизических и геохимических данных. Проявления IOCG в районе Тјårгојакка (рис. 40, 41) были выбраны для проведения петрофизико-геофизических исследований.

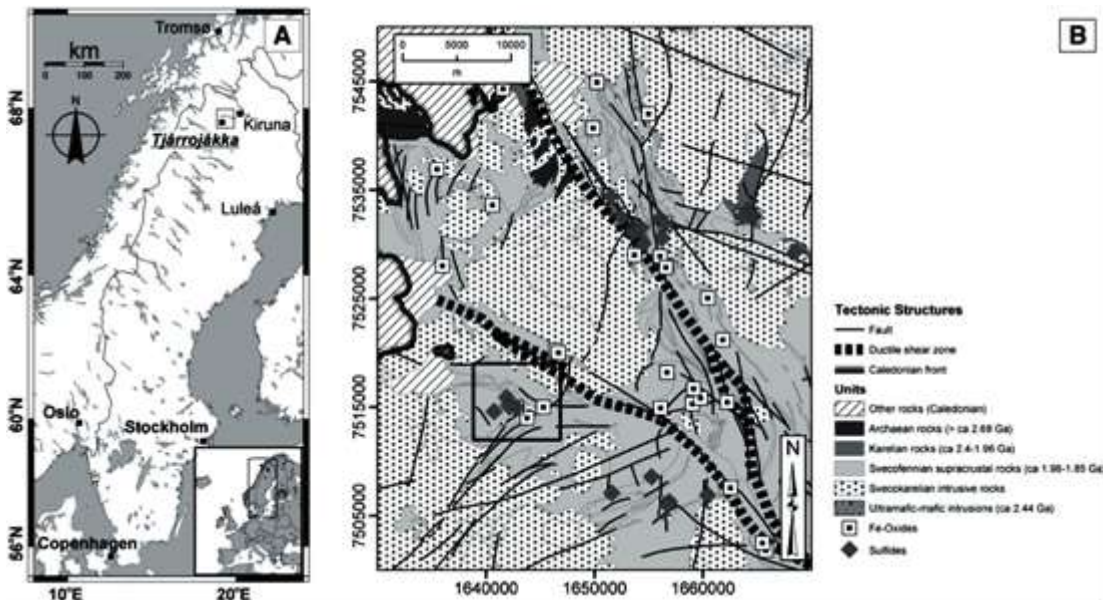




Рис. 40 а) Расположение исследуемой территории. б) Геологическая карта северной Швеции и расположение района Тjärrojåkka (квадрат).

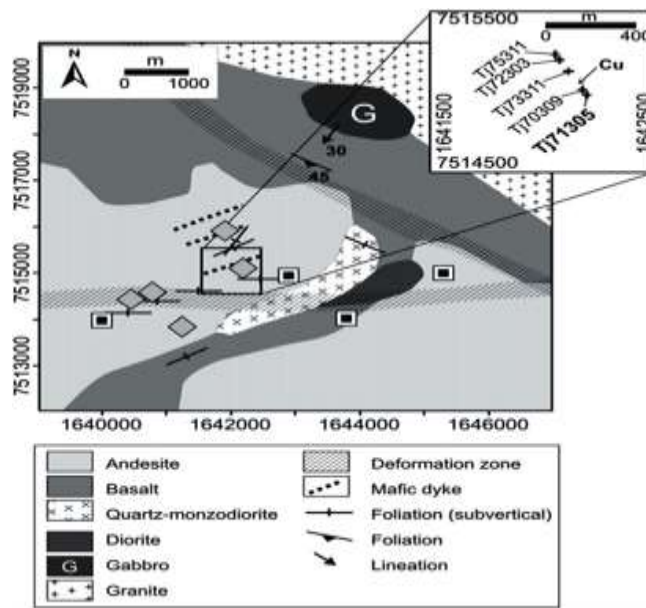


Рис. 41. Упрощенная геологическая карта района Тjärrojåkka.

Следующие характеристики IOCG месторождений делают геофизические методы важными для поисков:

1. Глубинные разломы, являются благоприятными факторами формирования оруденения.
2. Оруденение связано с натриево-калиевыми, калиевыми и др. гидротермально-метасоматическими изменениями пород.
3. Формированию оруденения предшествует образование магнетита, апатита.
4. Отсутствие сульфидов железа.

Некоторые типы изменений могут быть обнаружены геофизико-петрофизическими методами, например изменения, связанные с IOA и IOCG месторождениями (рис. 42).

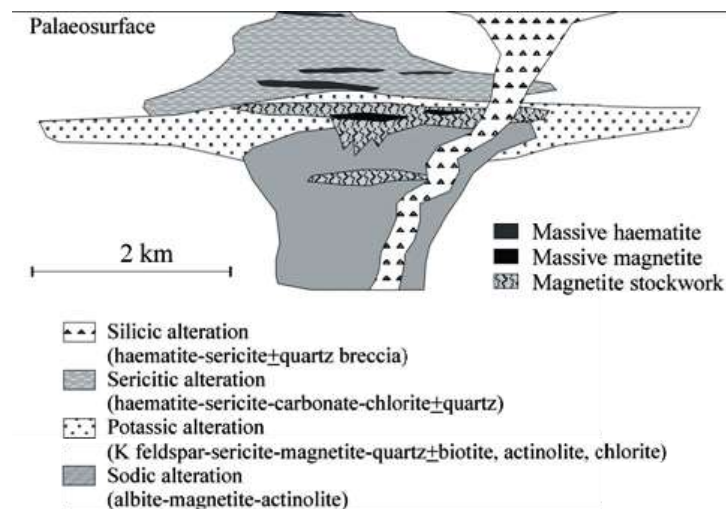


Рис. 42. Вертикальный разрез, показывающий зональность изменений, связанных с IOCG оруденением.

Так, натриевые изменения характеризуются ассоциацией альбит-магнетит+актинолит, следовательно, увеличение намагниченности может быть индикатором этих процессов. Калиевыми изменениями характеризуются увеличением биотита и калиевого полевого шпата.

Обогащение калием может быть обнаружено с помощью аэро-радиометрических данных. Обычно калиевые изменения связаны с одновременным истощением тория. Следовательно, отношение K/Th можно использовать для определения области калиевых изменений. Гематит образуется в результате окисления магнетита, что приводит к снижению намагниченности. Наконец, обогащение оксидами железа и рудными сульфидами меди влияет на плотность и электрические свойства горных пород. Если количество Fe- или Cu- минералов является значительным (40-60% по массе для магнетитовых руд), общая плотность породы может превышать 4000-4500 кг/м<sup>3</sup>. Различия в плотности вызывают изменения в гравитационном поле, что позволяет определить литологические границы и очертить тела с высокой плотностью (например, массивные руды) внутри вмещающих пород с низкой плотностью.

Основные зоны деформации в районе были определены с использованием аэромагнитных данных (рис. 43). Большая часть рудных месторождений в районе расположена в непосредственной близости от этих зон. Линейные отрицательные магнитные аномалии можно интерпретировать как зоны преобразования высокомагнитных минералов (например, магнетита) в менее магнитные фазы (например, гематит). Линейные магнитные элементы представляют собой разломы, содержащие измененные альбитом породы в областях, характеризующихся натриевыми изменениями. Зоны, в которых расположено ЮСГ оруденение, обогащены магнетитом из-за натриевых изменений. В региональном масштабе крупные скопления магнетита связаны с сильным магнитным сигналом, который, таким образом, можно рассматривать как их признак.

Гравиметрические данные показывают, что большинство известных рудных месторождений в этом районе, за некоторыми исключениями, расположены в пределах максимума силы тяжести или вблизи значительных градиентов силы тяжести (>5 мГал/км).

Радиометрические данные, отражающие высокие расчетные содержания калия, очерчивают обнажения гранитных интрузий (рис. 5а). Высокое содержание калия вызвано андезитовыми породами, претерпевшими калиевые изменения. Месторождения, связанные с Fe-Cu (рис. 44b), встречаются в областях с высоким отношением K/Th (> 0,5% /ppm), которое используется для определения зон, затронутых калиевыми изменениями.

В региональном масштабе настоящее исследование показывает, что месторождения связаны с основными зонами деформации земной коры, выраженными в виде линейных структур с низкой напряженностью магнитного поля и высокими градиентами гравитационного поля. Они расположены в областях с высоким отношением K/Th, что можно интерпретировать как проявление калиевых изменений.

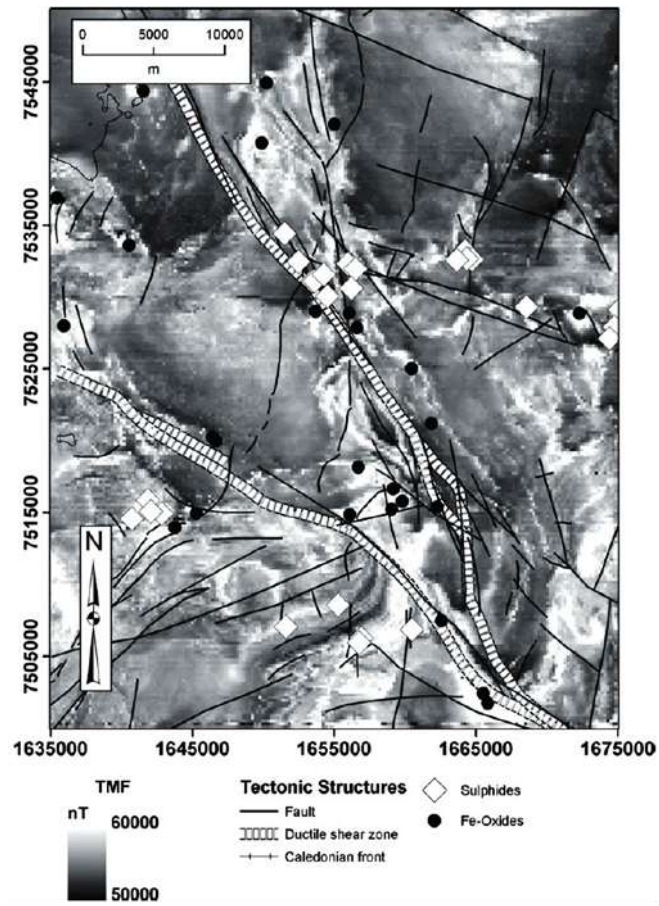


Рис. 43. Карта напряженности магнитного поля (TMF)

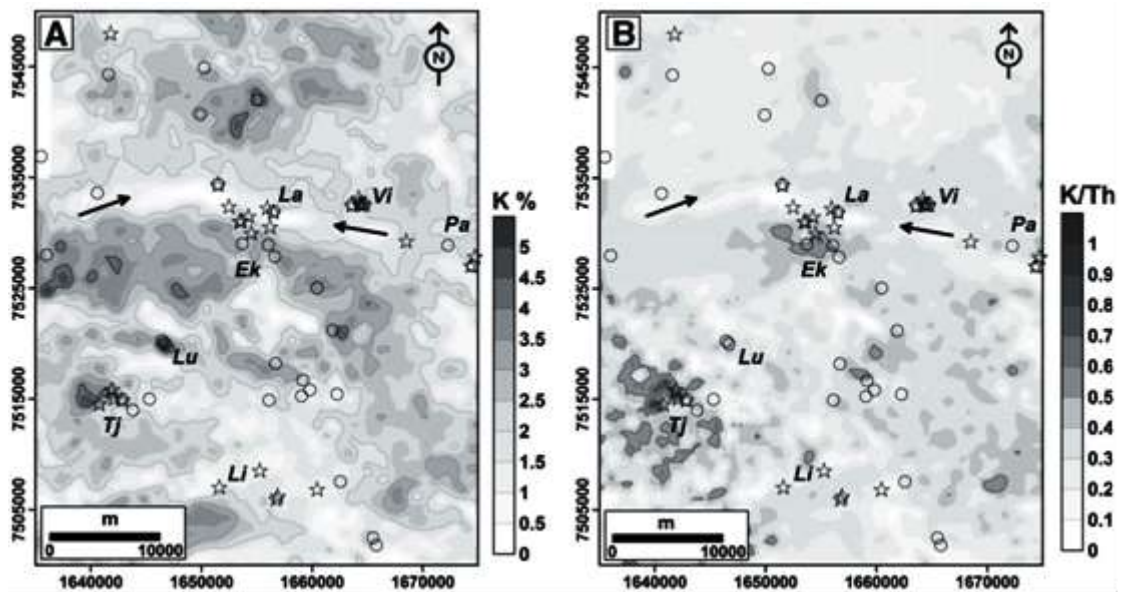


Рис. 44. (а) - содержания калия. (б) - отношения калий / торий.

Магнитные характеристики (рис. 43-45) позволяют выявлять особенности тектонического строения района

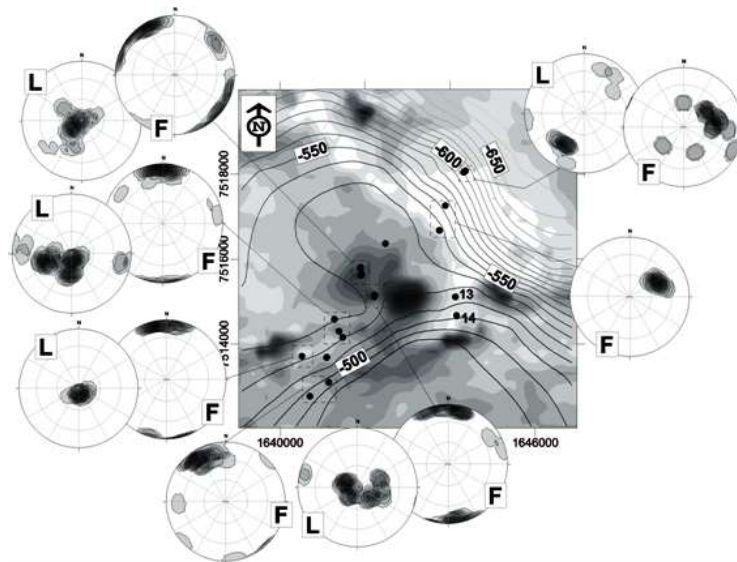


Рис. 45. Фрагмент магнитной карты района Tjårrojåkk со стереограммами, показывающими ориентацию полюсов по отношению к плоскостям магнитного слояния (F) и направление линейаций (L), полученное в результате анализа AMS.

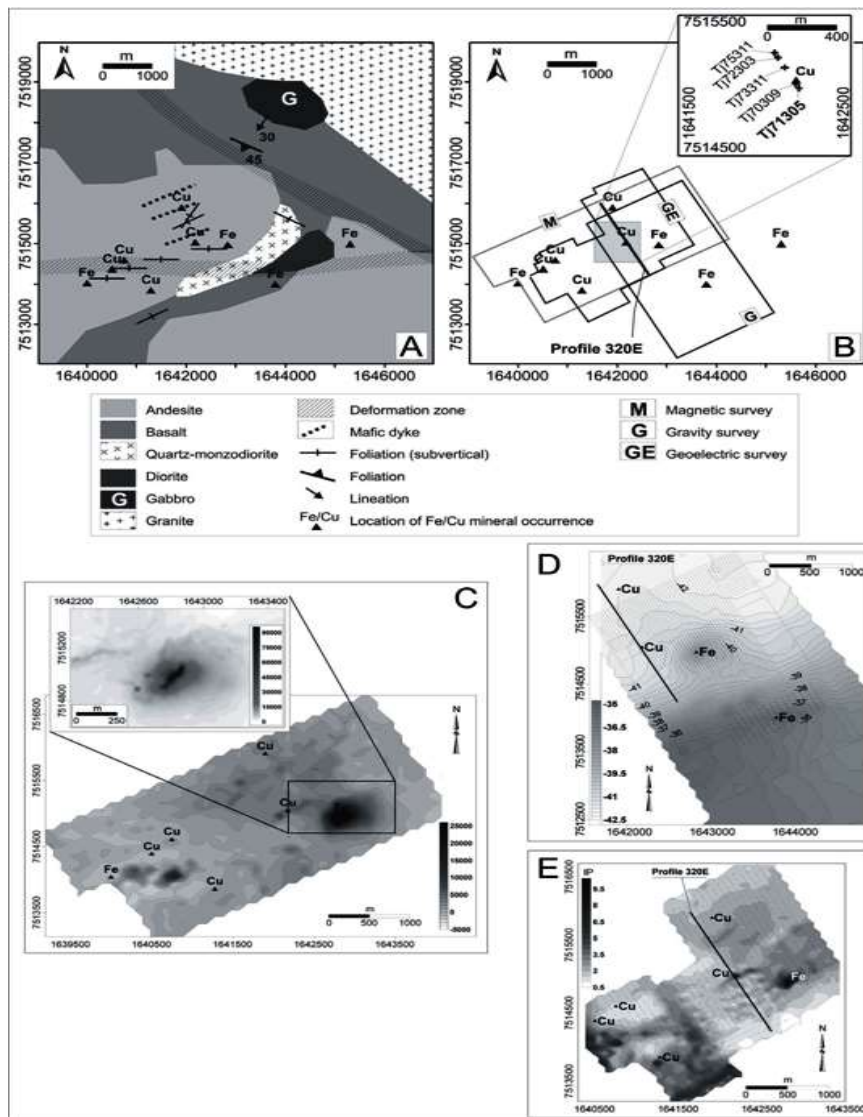


Рис. 46. (а) - упрощенная геологическая карта района . (b) - карта наземных геофизических исследований: (с) - магнитометрия, (d) - гравиметрия, (е) - геоэлектрическая (индуцированная поляризация).

Сильно магнитные Fe минерализованные тела (рис. 46с), пространственно связаны с немагнитной медной рудой, что выражается положительной аномалией силы тяжести (из-за

высокой плотности Cu-минералов (рис. 46d) и высокие значения наведенной поляризации (рис. 46e). Также в локальном масштабе можно обнаружить интенсивные калиевые изменения, которые пространственно связаны с медным оруденением (рис. 47).

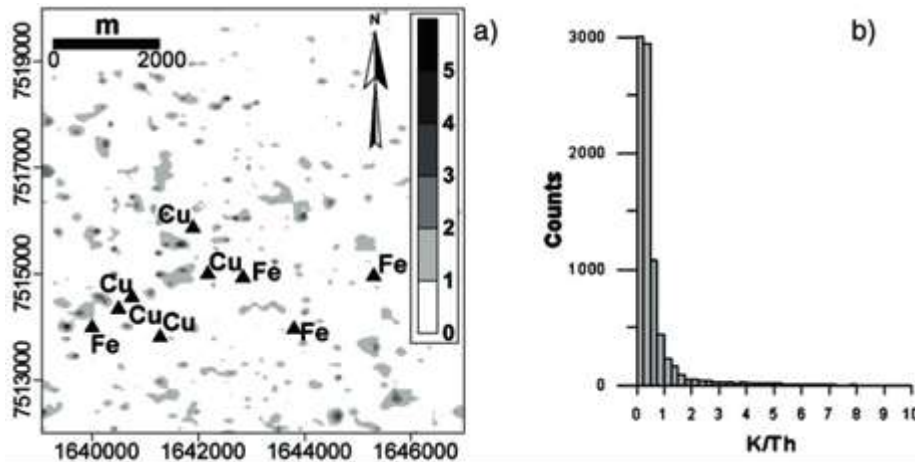


Рис. 47. (a) - отношения K/Th. (b) – Гистограмма выбранного предела ( $> 6$ ) для отношения K/Th для обозначения обогащения калием.

Дополнительные петрофизические анализы могут быть полезны для понимания геометрии месторождения и для оптимизации его эксплуатации с помощью комбинированного геологического и геофизического 3D моделирования.

В целом, на испытательном полигоне Tjårtojåkka IOCG оруденение пространственно связано с основными тектоническими линеаментами, с гравитационными и/или магнитными аномалиями и гидротермально-метасоматическими изменения горных пород, которые могут быть откартированы с использованием геофизических методов. Это позволяет построить простой технологический процесс для поисков IOCG месторождений:

1. Анализ региональных гравитационных и магнитных аэрогеофизических данных.
2. Анализ аэrorадиометрических данных для распознавания зон гидротермально-метасоматических изменений.
3. Анализ аэро- и наземных магнитных и электромагнитных данных с высоким разрешением в локальном масштабе для выявления сильномагнитных проводящих тел.
4. Геохимический и петрофизический анализы для определения взаимосвязи между петрофизическими свойствами, гидротермально-метасоматическими изменениями и оруденением.
5. Использование петрофизических данных для построения трехмерных моделей перспективных участков в качестве руководства для поискового бурения.

## 5. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЗЗ ПРИ ПОИСКАХ IOGC МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Создание поисковой модели IOGC месторождений большая проблема из-за сложности и разнообразия условий их формирования. Данные спутникового дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) могут предоставить дополнительную информацию для планирования полевых работ, помочь в интерпретации данных при поисковых работах.

*Мультиспектральные данные Landsat* - один из самых мощных инструментов для изучения и описания многих аспектов поверхности Земли, а также недорогой метод исследования. Спектральный анализ с использованием красного (0,63–0,69 мкм), зеленого (0,52–0,60 мкм) и синего (0,45–0,52 мкм) сочетания полос истинного цвета (3–2–1), который позволяет различать области с повышенными концентрациями оксидов железа (рис. 48).



Рис. 48 Пример проявления на поверхности повышенных концентраций оксидов железа (комбинация полос 3-2-1).

Бедные сульфидами месторождения с большими объемами оксидов железа и гидротермальными изменениями являются подходящими объектами для региональных аэромагнитных и гравиметрических исследований. В сочетании с полевыми геологическими наблюдениями гравиметрические и магнитные данные являются полезными, но дорогими инструментами при поисках м-ний IOGC.

Тип и состав минералов могут быть выявлены и интерпретированы путем изучения их характеристик поглощения в оптическом электромагнитном диапазоне. Эти спектральные характеристики в сочетании со спектральным разрешением различных типов изображений могут быть выявлены на поверхности земли по данным дистанционного зондирования. Поскольку различия в спектральных характеристиках поглощения многих минералов незначительны, выбор эффективного метода для выявления спектральных характеристик минералов имеет важное значение. Устранение избыточной информации и шума путем извлечения спектральных характеристик может ускорить и улучшить интерпретацию. Существует несколько методов выделения признаков на материалах дистанционного зондирования. Соотношение полос и анализ главных компонент (РСА) - широко используемые методы при картировании минералов.

Основным недостатком данных оптического дистанционного зондирования при разведке полезных ископаемых является недостаточная глубина проникновения. Большинство геологических полей плохо обнажены из-за растительности и снежного покрова.

Доступны два типа данных оптического дистанционного зондирования: гиперспектральные и мультиспектральные. Съемки «Гиперион» - наиболее эффективные гиперспектральные данные, используемые в геологических целях, но они не покрывают всю территорию земного шара. Доступны множественные мультиспектральные данные с полным глобальным охватом. Sentinel-2 имеет лучшее пространственно-спектральное разрешение и соотношение сигнал/шум среди доступных мультиспектральных данных. Обычно прямая идентификация и количественная оценка минералов возможна по местоположению, форме и величине ключевых характеристик поглощения в спектрах отражения. Эти особенности могут быть более точно извлечены из гиперспектральных или ультраспектральных данных, в то время как они отсутствуют или плохо заметны в мультиспектральных данных.

Картирование минералов с использованием мультиспектральных данных Sentinel-2 обычно выполняется с использованием косвенных методов, таких как преобразование и индексация данных или выделение признаков. Интеграция данных Sentinel-2 с другими данными является необходимой для повышения достоверности данных дистанционного зондирования при картировании минерального потенциала.

### **Использование ДЗЗ Земли Инглфида (СЗ Гренландии) [1].**

Интерпретация данные Copernicus Sentinel-2 включала интеграцию данных дистанционного зондирования с аэрогеофизическими материалами.

Земля Инглфилд (рис. 48), северо-запад Гренландии, в последнее время была объектом нескольких проектов с целью получения данных для разведки полезных ископаемых. Исследования проводились Геологической службой Дании и Гренландии (GEUS) (комбинированная аэромагнитная и электромагнитная съемка GEOTEM), наземные исследования (геологическое картирование, изучение минерализации и геохимическая съемка). Была составлена геологическая карта масштаба 1:500 000.

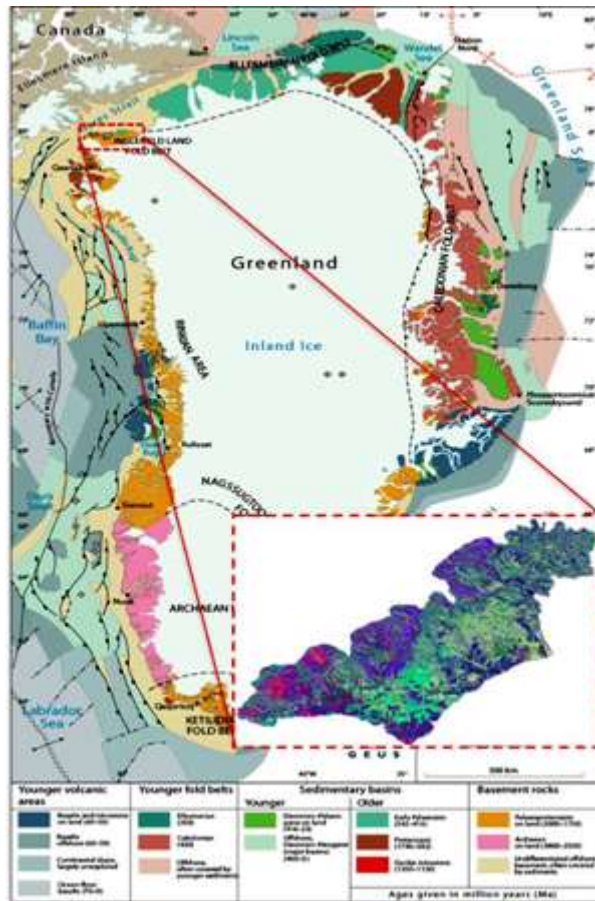


Рис. 48. Схема исследуемой территории (Земля Ингфида) на северо-западе Гренландии.  
Геологическая карта - проект GEUS.

Мультиспектральный аппарат Sentinel-2 оснащен широкоугольным датчиком с высоким пространственным разрешением. Для исследования были выбраны два комплекта (T19XDH и T19XEN) Sentinel-2 L1C, полученные 31 августа 2018 года. Они имеют 13 спектральных полос, охватывающих от видимого ближнего инфракрасного (VNIR) до коротковолнового (SWIR) (433–2190 нм) диапазона электромагнитного спектра.

Данные, использованные для интеграции с данными Sentinel-2:

- о Аэромагнитные данные
- о Электромагнитные данные во временной области (GEOTEM)
- о Геохимия русловых отложений и горных пород
- о Литология и структурно-геологические данные.

На рисунке 49 показан общий процесс обработки данных. После выполнения предварительной обработки спутниковых данных, которая включала радиометрические и др. (в основном атмосферные) поправки и повторную выборку, к данным применялись различные методы обработки выделения признаков. Аэрогеофизические данные (магнитные и электромагнитные), геохимические данные (отложения и почва) и данные полевых геологических наблюдений вносились в общую базу геоданных для интеграции и интерпретации изображений.



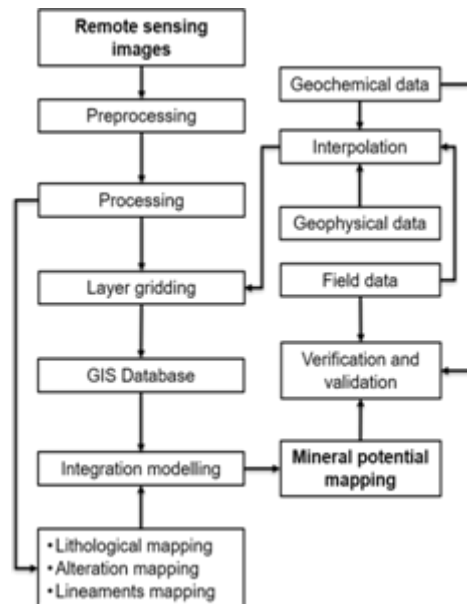


Рисунок 49. Блок-схема методологии.

*Sen2Cor* – метод предварительной обработки данных, разработанный Telespazio VEGA Deutschland GmbH от имени ESA для корректировки Sentinel-2 Level-1C от верхней части атмосферы (TOA) до продукта с коэффициентом отражения от нижней части атмосферы (BOA). Он включает в себя классификацию сцены, атмосферную коррекцию и последующее преобразование в данные уровня 2A. Для исходных диапазонов данных использовались три различных пространственных разрешения: 60, 20 и 10 м. Данные из полос с пространственным разрешением 20 м и 60 м повторно дискретизируются до 10 м методом интерполяции ближайшего соседа.

Многие минералы, можно распознавать по положению, прочности (глубине) и форме их характеристик поглощения. Цель - уменьшить размеры пространства данных без потери информации. Эти сокращенные данные затем позволяют разделить различные спектры посредством классификации. Существует несколько методов извлечения признаков, которые оказались особенно полезными при классификации изображений дистанционного зондирования. Основное внимание уделялось соотношению полос и PCA для создания карт, основанных на характеристиках спектрального поглощения измененных минералов.

*Соотношение полос* - это метод, при котором цифровые числа (DN, значения яркости) одной полосы делятся на цифровые числа другой полосы. Выбор соотношений основан на пиках и впадинах кривой отражения. Обычно полоса с более высоким коэффициентом отражения делится на полосу с низким коэффициентом отражения. Соотношения полос служат в качестве индикаторов минеральных ассоциаций или отдельных минеральных групп. На рисунке 50 показана карта соотношения полос 4/2 для изменения оксида железа и 11/12 для изменения гидроксила.

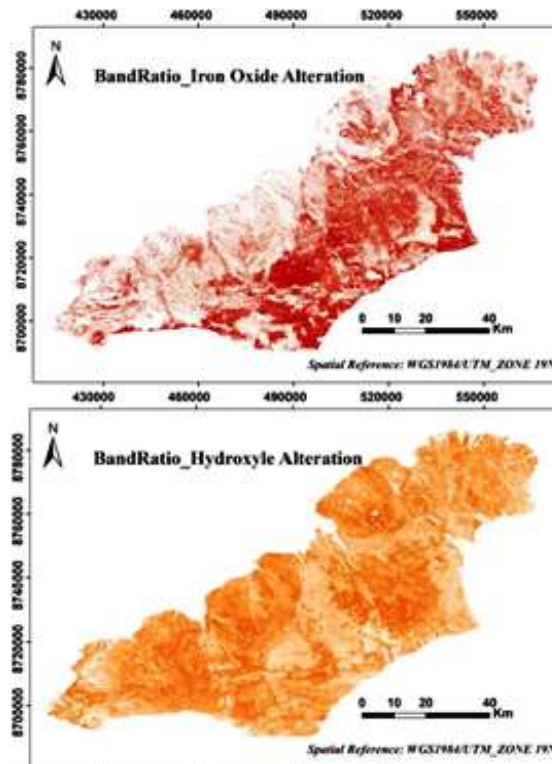


Рис. 50. Карты изменения FeO и OH, основанные на методах соотношения полос; пиксели с высокой интенсивностью цвета отмечают целевые области.

*Анализ главных компонент (PCA)* - это многомерный статистический метод, используемый для улучшения и отделения определенных типов спектральных сигнатур от фона. Применяя линейное преобразование, этот метод уменьшает избыточность коррелированных данных и преобразует набор коррелированных входных полос в некоррелированные главные компоненты (ПК). Величина соответствующих собственных значений дает информацию, хотя и не полностью достоверную, о составе и распределении поверхностного материала. На рисунке 51 показан результат PCA для картирования изменений оксида железа (полосы 3, 6, 8а и 11) и гидроксильных групп (полосы 3, 8, 11 и 12).

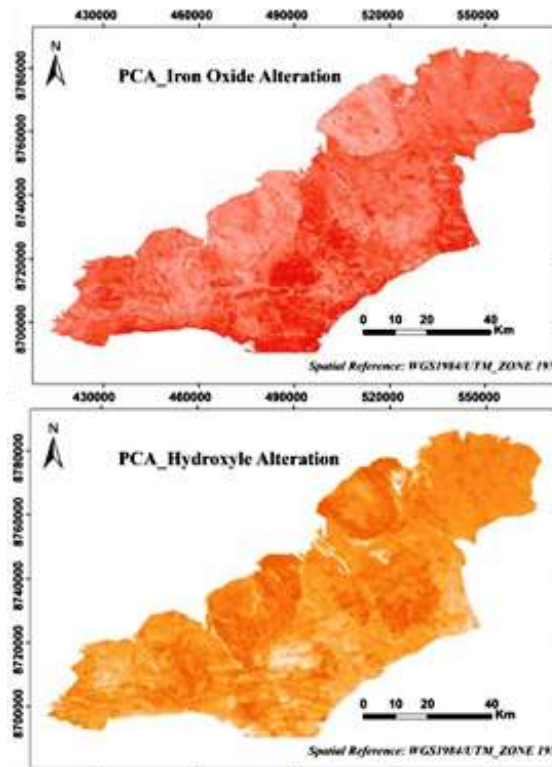


Рисунок 51. Карты изменений FeO и OH, основанные на методе PCA; пиксели с высокой интенсивностью цвета отмечают целевые области.

Линеаменты часто используются в качестве индикаторов геологических структур. По яркостному контрасту и рисунку спутникового снимка отображены линеаменты исследуемой территории. Были применены направленные фильтры к значениям PC1 PCA. Линеаменты, созданные из изображений с использованием направленных фильтров, показаны на рисунке 52.

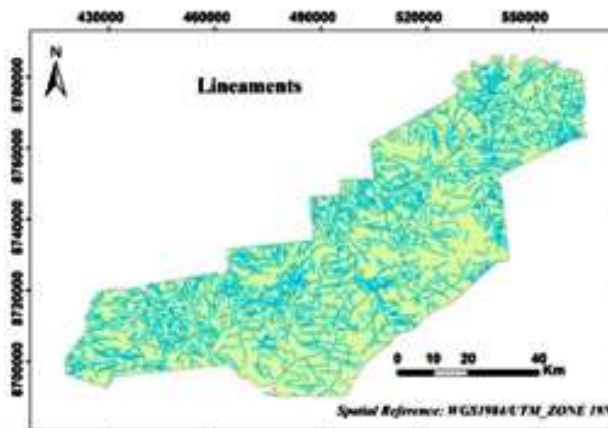


Рис. 52. Линеаменты, основанные на применении направленных фильтров.

Методы классификации изображений можно разделить на два типа: контролируемые и неконтролируемые. В контролируемых классификаторах в качестве обучающих выборок используются пиксели изображения, представляющие области известных функций. Неконтролируемые классификаторы идентифицируют группы пикселей, которые демонстрируют аналогичный спектральный отклик. Самоорганизующиеся карты (SOM) в качестве неконтролируемого классификатора и машина опорных векторов (SVM) в качестве

контролируемого классификатора выбираются для выделения литологических и структурных единиц из изображений Sentinel-2 исследуемой области.

*Самоорганизующаяся карта SOM* - это метод векторного квантования, который размещает векторы-прототипы на регулярной низкоразмерной сетке в упорядоченном виде. SOM состоит из «нейронов», организованных в низкоразмерную сетку. Каждый нейрон представляет собой  $d$ -мерный весовой вектор, где  $d$  равно размерности входных векторов. Нейроны связаны с соседними нейронами отношением соседства, которое определяет топологию или структуру карты.

Обработка SOM преобразует нормализованные входные данные в другой меньший набор данных. Это преобразование, называемое «наилучшим соответствием» (BMU), имеет такое же количество типов данных (ту же размерность), что и входные данные. Нормализация данных выполняется путем вычитания среднего и последующего деления со стандартным отклонением данных. BMU в SOM представляет собой двумерную карту - пространство SOM. Каждому из входных данных соответствует BMU. Входные данные могут быть связаны с одним и тем же BMU, и в этом случае SOM можно рассматривать как сокращение входных данных. U-матрица (рис. 53) описывает отклонение конкретной ячейки от соседних с использованием среднего «расстояния» между BMU.

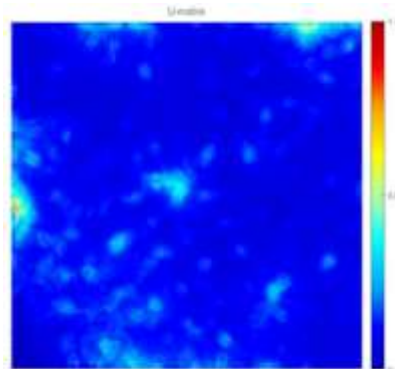


Рисунок 53. Пример U-матрицы в SOM.

Более темные синие цвета представляют небольшие расстояния и указывают на сходство, тогда как красный цвет показывает большие расстояния и, следовательно, несходство. Группа зеленых и красных сегментов появляется в разных местах и указывает на то, что сеть организовала данные в различные кластеры. BMU дополнительно анализирует кластеризацию данных. Используется стандартная процедура кластеризации  $k$ -средних. На рисунке 54 показана окончательная кластерная карта на основе алгоритма SOM.

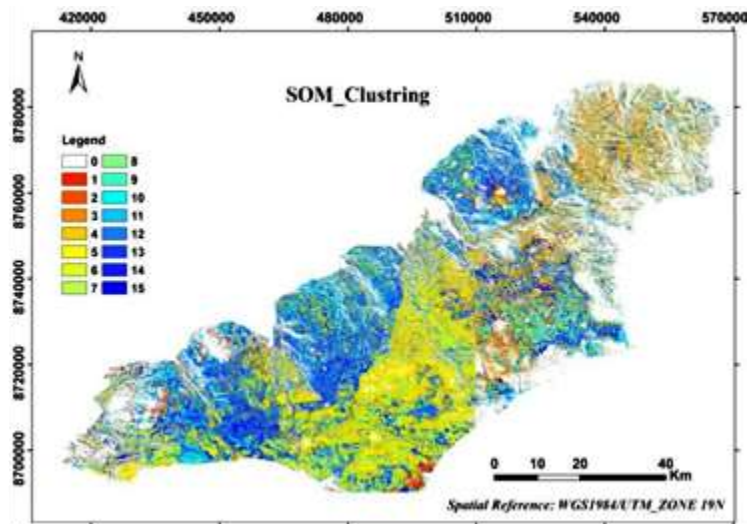


Рис. 54. Кластеризация SOM данных Inglefield Land Sentinel-2. Локации, покрытые снегом- белый цвет.

Всего на основе анализа индекса Дэвиса-Билдина было отобрано 15 к-средних кластеров. Сравнение каждого кластера с известными геологическими, литологическими данными дает ключ к классификации и прогнозу.

*Машина опорных векторов SVM* - один из наиболее часто используемых классификаторов для многополосных изображений. Опорные векторы (SV) используют оптимальную гиперплоскость с максимальным расстоянием между ближайшими точками. Опорные векторы лежат на границах обучающих выборок, что дает максимальный запас между двумя классами и помещает разделяющую линейную гиперплоскость между ними. Одним из преимуществ SVM является то, что он требует небольшого размера обучающей выборки по сравнению с обычными классификаторами. Обучающие образцы для классификатора SVM были отобраны на основе геологических данных. Рисунок 55 иллюстрирует литологическую классификацию на основе SVM с использованием изображений Sentinel.

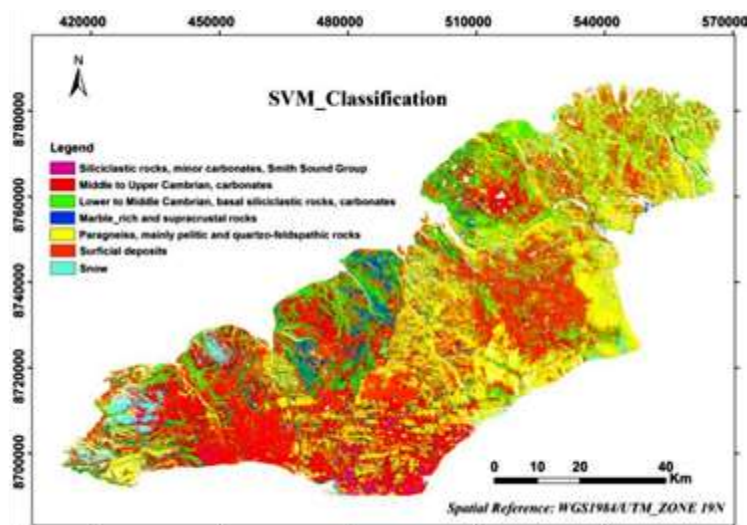


Рис. 55. SVM-классификация данных Inglefield Land Sentinel-2.

Интеграция данных является ключевым элементом проводимых исследований. Различные тематические (геологические, геофизические, геохимические) карты объединяются для создания карты перспективных участков.

Метод нечеткой аналитической иерархии *FAHP* - метод гибридной интеграции данных, основанный на нечеткой логике и весах входных слоев широко используется для принятия решений по нескольким критериям. *FAHP* основывается на трех основных принципах:

- Построение иерархии
- Выбор приоритета
- Логическая последовательность

Качество результатов *FAHP* связано с согласованностью парных сравнительных суждений. Логическую согласованность можно оценить на основе рассчитанных коэффициентов согласованности (CR). Шаги применения *FAHP* в этом проекте:

1. Девять входных уровней (рис. 56) получены из трех типов данных: дистанционного зондирования, аэромагнитных и электромагнитных.

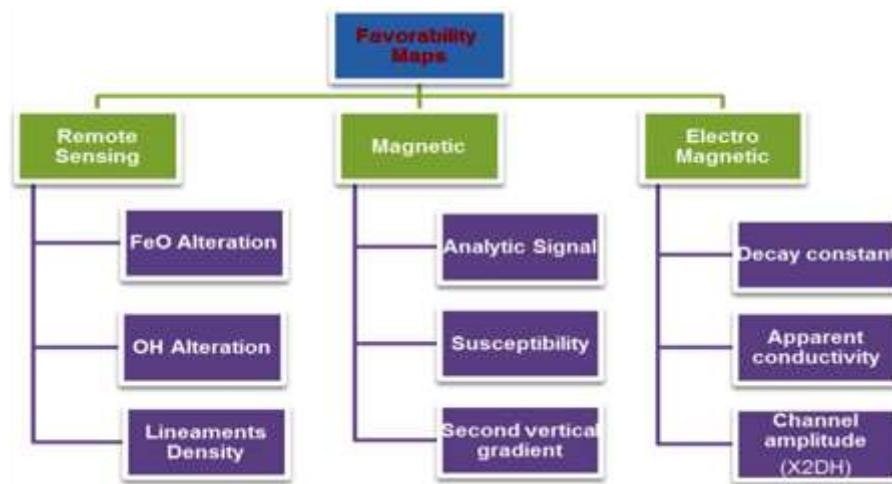


Рисунок 56. Блок-схема входных слоев данных.

Карты изменений оксида и гидроксида железа и карта плотности линеаментов показаны на рисунке 57.

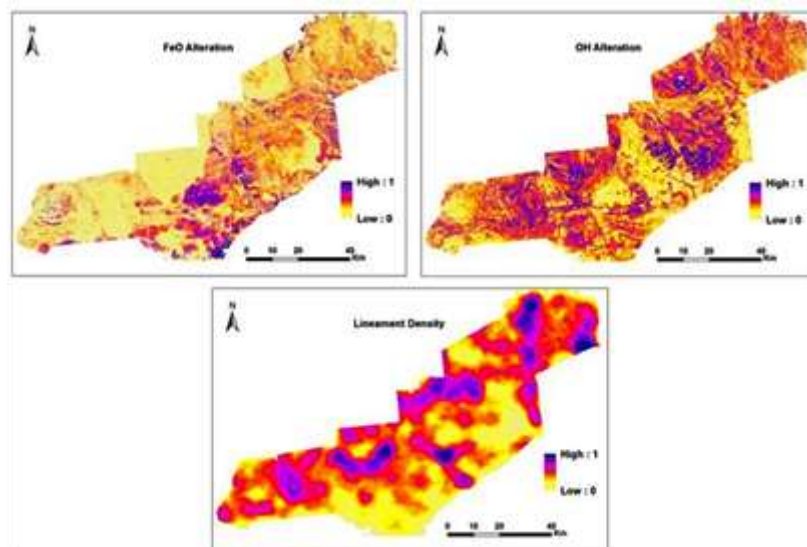


Рисунок 57. Доказательные слои данных дистанционного зондирования.

2. В качестве входных геофизических слоев общего магнитного поля были использованы: аналитический сигнал, кажущаяся восприимчивость и вертикальная производная второго

порядка (рис. 58), а также аэроэлектромагнитные данные GEOTEM: постоянная времени затухания, кажущаяся проводимость, амплитуда канала 12 (рис. 59).

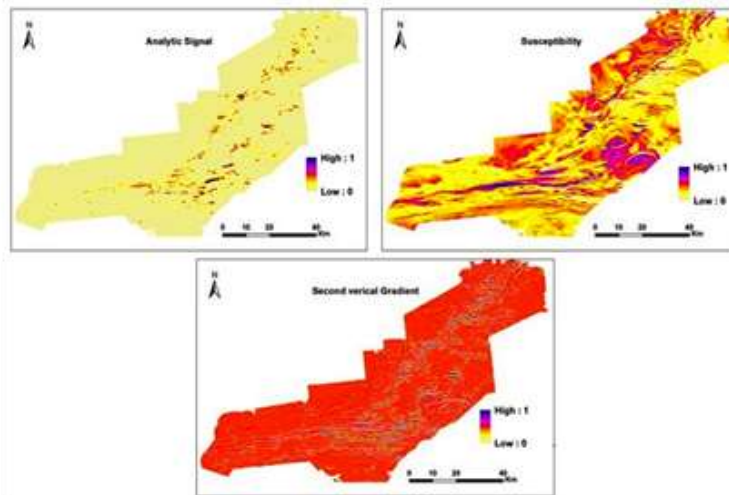


Рисунок 58. Доказательные слои магнитных данных.

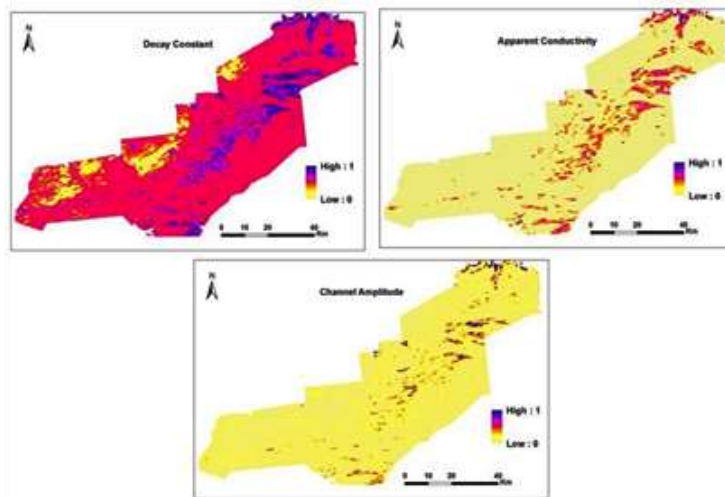


Рисунок 59. Доказательные слои электромагнитных данных.

3. Матрицы парных сравнений были построены с использованием трех вариантов решений (DM) (табл. 4).

Табл. 4. Матрицы парных сравнений доказательных слоев.

<b>DM1</b>	FeO	ОН	Lineaments
FeO	1	3	2
ОН	0.33	1	0.5
Lineaments	0.5	2	1
<b>DM2</b>	FeO	ОН	Lineaments
Feo	1	1	2
ОН	1	1	2
Lineaments	0.5	0.5	1
<b>DM3</b>	FeO	ОН	Lineaments
FeO	1	1	2
ОН	1	1	1
Lineaments	0.5	1	1

4. Расчетные коэффициенты согласованности, полученные из матриц парных сравнений, были менее 0,1.

5. Были составлены нечеткие оценочные матрицы по всем трем типам данных.

6. Были определены веса девяти доказательных слоев.

7. Доказательные слои были объединены «нечеткими суммами».

8. Рассчитанные веса были умножены на соответствующие уровни доказательств.

Для интеграции карт был использован «оператор нечеткой гаммы» (гамма = 0,9) с целью построения окончательной карты перспективных участков (рис. 60).

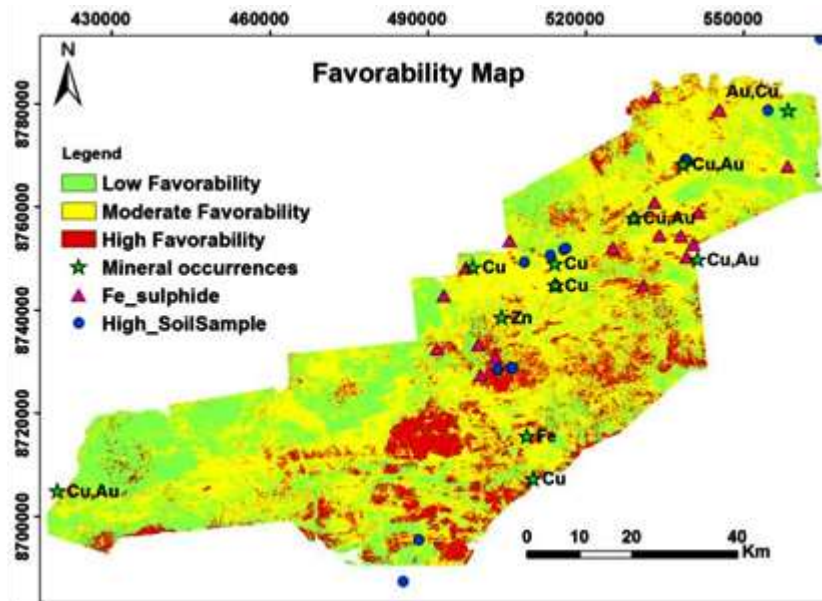


Рис. 60. Карта перспективности, основанная на применении метода ГАНР.

9. С использованием геохимической и геологической полевой информации была проведена проверка карты перспективности.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Результаты классификаторов SOM и SVM хорошо согласуются с геологической картой территории исследования.
2. На итоговой карте отмечается значимая корреляция между проявлениями рудной минерализации и участками с высокой перспективностью.
3. Намеченные перспективные участки, в пределах которых не выявлены проявления рудной минерализации, с некоторой долей допущения, можно рассматривать как возможные новые поисковые площади.
4. Интеграция дистанционного зондирования и аэрогеофизических данных с использованием различных методов корреляционного анализа дает результаты, представляющие интерес для наземных ГРП. ДДЗ Sentinel-2 предоставляют информацию, применимую для поисков IOCG и других типов рудных месторождений.



## 6. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИОСГ ПОТЕНЦИАЛА НА ОСНОВЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О РУДНЫХ СИСТЕМАХ (Австралия) [8, 14]

Тип ИОСГ месторождений формируется в результате процессов, происходящих в земной коре в масштабах от литосферы до месторождения, при условии, что соответствующие рудообразующие факторы совпадают в пространстве и времени. Исходя из существующих представлений, рассматривается понятие рудной системы (рис. 61), в которой совпадают и эффективно работают четыре компонента:

- 1) Источники рудных металлов (меди, золота, урана, редкоземельных элементов) и гидротермальных растворов.
- 2) Источники энергии для подачи флюидов в рудообразующую систему.
- 3) Структура активности земной коры и мантии, представленная траекторией гидротермальных растворов и/или потоков магмы.
- 4) Физико-химические градиенты, способствующие осаждению рудных металлов и формированию рудных тел.

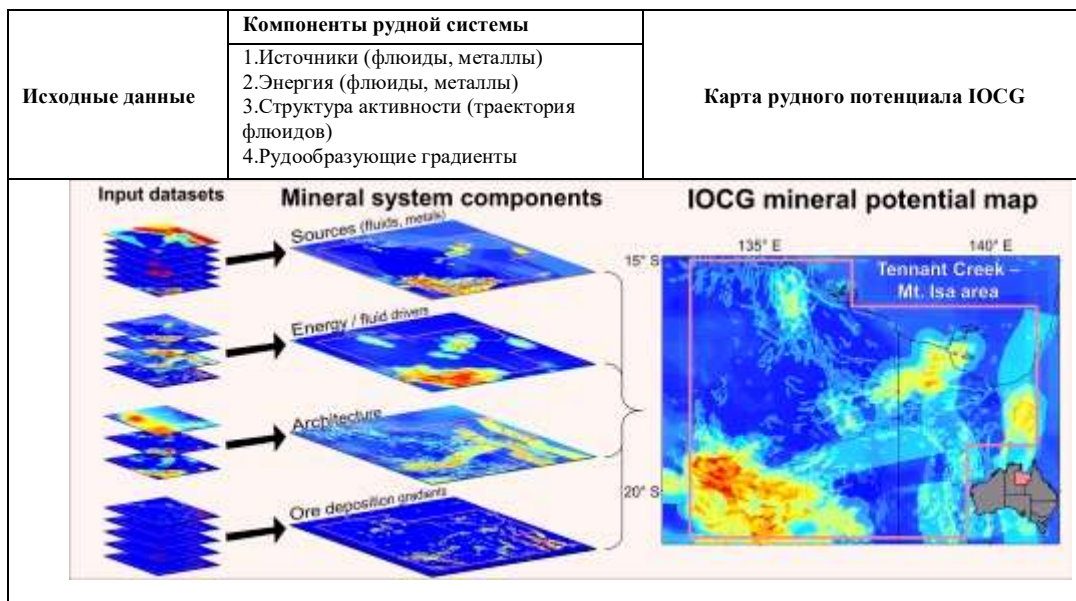


Рис. 61 Понятие рудной системы

Эта комплексная мультимасштабная структура использовалась для разработки практического метода минерагенического картирования на основе *знаний*, но с использованием *эмпирических данных* как в масштабе рудного района, так и в масштабе континента. Устанавливается, как компоненты рудной системы можно преобразовать в картируемые параметры и создавать карты рудного потенциала путем объединения разнообразных наборов исходных данных. Метод позволяет прогнозировать рудный потенциал не только для районов с уже известными месторождениями, но и для районов, где только ведутся поисковые работы, а также для закрытых территорий, в пределах которых нет известных рудных проявлений. Приводятся результаты применения этой методологии для регионального картирования рудного потенциала Австралии на тип ИОСГ с использованием

результатов ГРР, проводимых за последнее десятилетие на пяти площадях в северной части штата Квинсленд, восточной части Южной Австралии и южной и центрально-восточной частях Северной территории. Неопределенности в результатах, возникающие в результате присвоения весовых коэффициентов слоям исходных данных, оценивались с помощью вероятностного моделирования методом Монте-Карло. Результаты 500 сопоставлений с использованием произвольно назначенных весовых коэффициентов в целом подтверждают детерминированные результаты, но также показывают, что результаты моделирования в основном зависят не от весовых коэффициентов, а от исходных геоданных (например, гравитационных максимумов и минимумов).

Результаты анализа рудного потенциала IOCG м-ний на основе знаний с использованием эмпирических данных были сопоставлены с уже известными данными (которые не использовались непосредственно в данном анализе). Во всех пяти примерах (в штатах Квинсленд, Южная Австралия и Северная Территория), за редким исключением, было обнаружено хорошее пространственное соответствие. Статистический анализ результатов прогнозного картирования на территории Tennant Creek – Mt Isa показал, что 15 из известных 16 месторождений типа IOCG находятся в зонах, выделенных по результатам моделирования в качестве наиболее перспективных, и эти зоны занимают около 4,2% от всей изучаемой площади, то есть площадь поиска сужается на 95,8%. Более того, в областях, выделенных ранее в качестве весьма перспективных, было сделано несколько новых открытий. Это подтверждает целесообразность применения методики Geoscience Australia в качестве инструмента *поддержки принятия решений (ППР)*, который помогает геологоразведочным компаниям в выборе площадей различных масштабов для поиска IOCG и других типов рудных систем.

Выбор площадей разного ранга является одним из наиболее важных решений, с которыми сталкиваются компании, занимающиеся поисками и разведкой полезных ископаемых. Это ясно видно из снижения темпов открытия крупных рудных месторождений за последнее десятилетие и увеличения глубины залегания вновь открытых месторождений. Одним из инструментов, способствующих выявлению новых потенциально продуктивных рудных провинций, является прогнозное минерагеническое картирование. В общих чертах эти ГИС-методы картирования облегчают объединение больших и разнородных наборов геоданных, используя подходы, основанные либо на знаниях, либо на опыте. У каждого подхода есть свои преимущества и недостатки. Этот метод опирается на знания о рудных системах, в том числе о механизмах формирования крупных рудных месторождений и о рудоконтролирующих факторах. Ключевым преимуществом этого подхода является то, что он позволяет прогнозировать потенциал конкретных регионов на наличие рудных систем того или иного типа, независимо от наличия в пределах региона уже известных месторождений

данного типа. Это возможно благодаря тому, что основные рудообразующие или рудные системы оставляют «следы», которые можно обнаружить в геологических, геофизических и геохимических данных в масштабе месторождений, рудных районов и даже кратонов.

Начиная с 2010 года, Geoscience Australia осуществила более восьми проектов, связанных с картированием рудного потенциала на уран и другие полезных ископаемые, связанные с энергетикой, на основе концепции рудных систем - сначала в Yilgarn Craton (орогенное золото), а затем в ряде рудных районов (рис. 62).

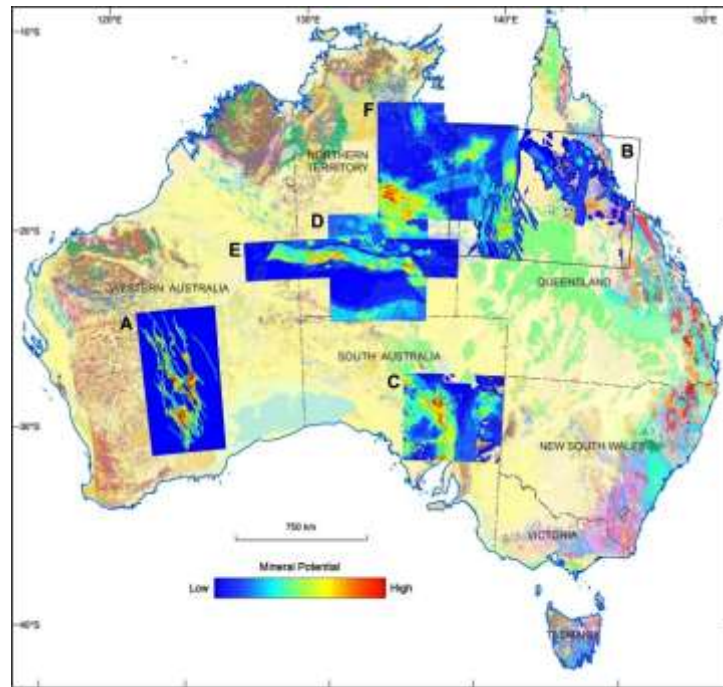


Рис. 62. Региональное минерагеническое картирование, проводимое Geoscience Australia с 2010 года, в том числе: в восточной части Yilgarn Craton, штат Западная Австралия (сегмент карты **A** - орогенное золото), в северной части штата Квинсленд (сегмент карты **B** - IOCG и урановорудные системы), центрально-восточная часть штата Южная Австралия (сегмент карты **C** - IOCG и урановорудные системы), южная часть штата Северная Территория (сегмент карты **D** - IOCG и урановорудные системы), южная часть рудного района Argunta (сегмент карты **E** - IOCG) и район Tennant Creek - Mt Isa (сегмент карты **F** - IOCG).

*(На карте представлено геологическое строение поверхности (карта масштаба 1: 1000000, Geoscience Australia); бледно-желтые и бледно-зеленые области обозначают кайнозойские и мезозойские осадочные бассейны соответственно; более темные цвета - обнажения древних пород).*

Эти проекты включали изучение рудного потенциала на урансодержащий тип IOCG на северо-западе штата Квинсленд (Skirrow and Huston, 2010), в штате Южная Австралия (Skirrow et al., 2011) и южной части штата Северная Территория (Huston et al., 2012). Методология картирования перспективных площадей основана на процедурах, разработанных авторами Czarnota et al. (2010) и геологоразведочным центром при Университете Западной Австралии (McCuaig et al., 2010), а затем адаптирована и усовершенствована для целей привлечения инвестиций в ГРП в пределах новых рудных провинций. В 2016 г. компания Geoscience Australia завершила проект, связанный с картированием рудного потенциала на магматические месторождения сульфидов Ni-Cu-PGE в интрузивных породах в масштабе континента (Dulfer et al., 2016). На основе изучения медно-никелевых месторождений с элементами группы платины (Ni-Cu-PGE) был разработан

онлайн-инструмент для минерагенического картирования, который позволяет конечным пользователям создавать нужные им модели и получать новые карты. Совсем недавно было проведено исследование рудного потенциала на тип IOCG в рудном районе Tennant Creek - Mt Isa. Эта работа включает в себя новейшие генетические модели рудообразующих систем типа IOCG и использует несколько наборов исходных данных, которые ранее не использовались в минерагеническом картировании, включая электропроводность, полученную по результатам глубинной магнитотеллурической съемки.

### **Концептуальные основы понятия «рудная система»**

Концепция «рудных систем» была впервые разработана в Австралийской геологоразведочной организации (AGSO), предшественнице Geoscience Australia, в качестве основы для мультимасштабного описания геологических факторов, необходимых для формирования месторождений ПИ. Первоначальная формулировка включала семь основных геологических факторов: (1) источники минерализующих растворов и лигандов, (2) источники металлов и других рудообразующих компонентов, (3) пути миграции растворов, (4) температурный градиент, (5) источник энергии, (6) механический и структурный механизм рудообразования и (7) химические и/или физические ловушки для осаждения руды.

Масштаб рудообразующей системы, включающей область взаимодействия раствор-порода и образование магмы, обычно на несколько порядков больше, чем сами месторождения. Поэтому обнаружение и мультимасштабное картирование «следов» взаимодействий раствор-порода и магматических систем может привести к выявлению первоначальной поисковой площади гораздо большего размера, чем сами месторождения. После выявления рудной системы потребуются более детальные исследования для перехода к потенциально рудным зонам в пределах этих систем.

Обобщенная схема включает в себя концепцию *критического рудообразующего временного окна*, и преобразует семь описанных факторов в четыре критических компонента рудной системы, которые достаточно легко поддаются мультимасштабному картированию:

- источники рудных компонентов (рудных металлов, серы), флюидов и лигандов;
- источники энергии для активизации рудообразующих процессов;
- структура земной коры и мантии, представленная траекторией активных флюидов и/или потоков магмы;
- рудообразующие градиенты, представляющие пространственные и/или временные изменения физико-химических параметров, способствующие осаждению руд. (рис. 63):

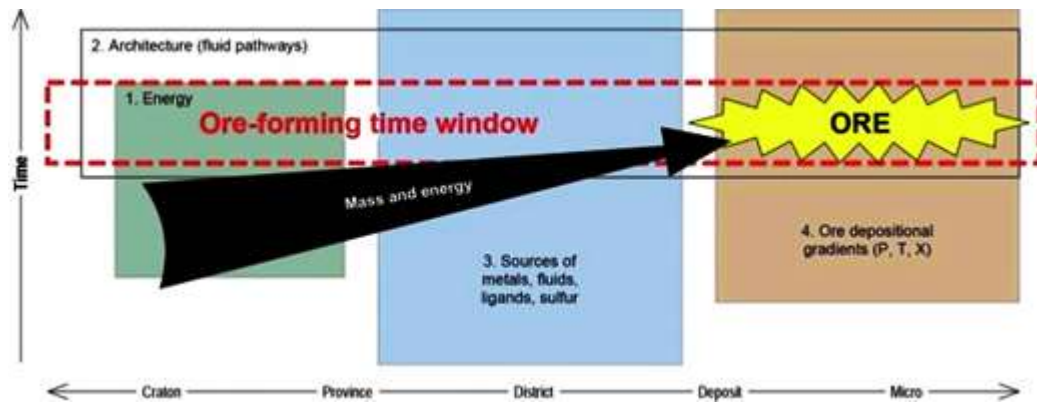


Рис. 63. Схема гидротермальной или магматической рудной системы, иллюстрирующая концепцию рудообразующего временного окна, когда четыре основных геологических компонента рудной системы (пронумерованные прямоугольники) совпадают во времени и пространстве. Надписи на рисунке: 1. Энергия (серо-зеленый квадрат), 2. Структура (траектории растворов) (белый квадрат), 3. Источники металлов, растворов, лигандов, серы (голубой квадрат), 4. Рудоконтролирующие градиенты (P, T, X) (коричневый квадрат), Временное рудоформирующее окно (красный пунктир) Масса и энергия (черная стрелка) Руда (желтая фигура с зубчатыми краями) Горизонтальная ось: масштабы: кратон, провинция, район, месторождение, микро-масштаб Вертикальная ось: время

Каждый из четырех компонентов рудной системы присутствует в системе в разных масштабах, от масштаба кратона до месторождения и микро-масштаба, и может проявляться в разное время. Приведенный пример показывает, как структурный компонент (например, разлом) действует только на последних этапах, когда появляется источник энергии для активизации движения флюидов или потоков магмы. На диаграмме также показано, что масса и энергия концентрируются внутри системы и направлены к месту, где изменение давления и/или температуры и/или химического состава системы (P, T, X) приводят к формированию месторождения.

### **Прогнозное моделирование и методика геоинформационного (ГИС) картирования Обоснование моделирования, проводимого на основе знаний и эмпирических данных.**

При проведении прогнозного моделирования предполагается, что площадь является перспективной, если она характеризуется теми же или аналогичными признаками, что и известные месторождения данного типа.

Методы, основанные на эмпирических данных, используют программное обеспечение ГИС и пространственное цифровое моделирование. Анализ, основанный на эмпирических данных, построен на взаимосвязях между известными месторождениями или рудопроявлениями (так называемыми *обучающими данными*) и оцифрованными геологическими, геохимическими и/или геофизическими параметрами. Эти статистические зависимости затем используются для автоматического моделирования рудного потенциала в других регионах, расположенных далеко от известных месторождений. Методики статистического или машинного *обучения* включают метод логистической регрессии, метод весомости признака и метод нейронных сетей. Моделирование, основанное на эмпирических данных, наиболее эффективно в регионах, где имеется множество известных месторождений

данного типа, и представляет подход, при котором выявляются области с геологическими признаками, аналогичными *обучающим данным*.

В отличие от моделирования с помощью эмпирических данных, моделирование на основе *знаний* использует модели рудообразования (например, модели рудных систем), а не эмпирические взаимосвязи. Эта методика включает в том числе метод наложения (*метод «скользящего индекса»*) и метод нечеткой логики (*Нечеткая логика основана на теории нечетких множеств в отличие от классической теории четких множеств. Если для четких множеств результатом вычисления характеристической функции могут быть только два значения – ноль или единица, то для нечетких множеств это количество бесконечно, но ограничено диапазоном от нуля до единицы*).

В общих чертах методика включает:

- (1) определение ключевых геологических процессов рудообразования для месторождений конкретного типа;
- (2) выявление в картируемых геологических параметрах признаков этих ключевых процессов (*прокси*);
- (3) отбор и обобщение оцифрованных пространственных данных, наилучшим образом представляющих картируемые геологические признаки;
- (4) присвоение весовых коэффициентов или степени перспективности исходным картируемым наборам данных;
- (5) создание общих карт перспективности площадей путем объединения слоев исходных данных.

Хотя методы прогнозного моделирования, основанные на эмпирических данных, являются более объективными, чем методы, основанные на *знаниях*, последние в большей степени подходят для целей выявления новых, ранее не изученных, потенциально рудных площадей, особенно в регионах, где мало или нет известных месторождений данного типа. Более того, благодаря упору на рудообразующие процессы, подход, основанный на *знаниях*, в большей степени способен выявлять варианты месторождений нужного типа по сравнению с альтернативным подходом, который может выявить только месторождения «очень похожие» на *обучающие*. Для того, чтобы сгладить плюсы и минусы различных подходов показана полезность как объединения этих методов в один гибридный подход, так и последовательного их применения с последующим сравнением результатов.

Метод опирается на большие объемы сложных разнородных геонаучных данных. Для прогнозных целей преимущества этого метода перевешивают недостатки той или иной модели рудообразования, которые неизбежно искажают результаты. Для снижения вероятности таких искажений картирование включает в себя несколько возможных генетических моделей IOCG рудообразования.

***Алгоритм минерагенического картирования.***

Алгоритм, используемый в настоящее время компанией Geoscience Australia, был разработан в 2010–2011 гг. для изучения урановорудного потенциала в Южной Австралии (включая ураносодержащие месторождения типа IOCG) и аналогичен алгоритму, описанному McCuaig et al. (2010) (Schofield, 2011). Этот метод с незначительными изменениями использовался Geoscience Australia во всех последующих прогнозно-минерагенических исследованиях регионального и континентального масштаба и был автоматизирован с помощью скриптов (программ) на языке Python для использования при изучении медно-никелево-платиноидного рудного потенциала (Ni-Cu-PGE) в масштабе всего австралийского континента (Coghlan, 2015, Dulfer et al., 2016). Применение этого метода ГИС-анализа, (основанного на *знаниях*, с использованием наложения прогнозных карт) для рудных систем типа IOCG мы продемонстрируем ниже.

Алгоритм картирования рудного потенциала состоит из следующих этапов (рис. 64):

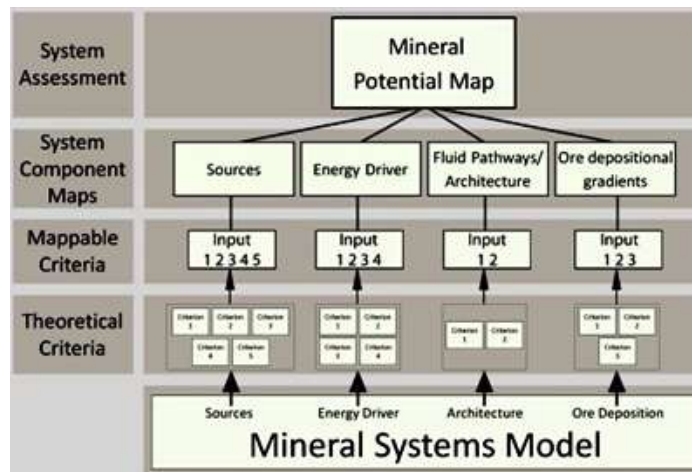


Рис. 64. Краткое описание алгоритма, используемого при картировании рудного потенциала.

1. Разработка модели рудной системы для конкретного типа месторождений, в котором ключевые геологические процессы («теоретические критерии»), или предпосылки рудообразования определяются по четырем основным компонентам рудной системы.
2. Выявление картируемых геологических параметров, которые являются признаками ключевых процессов («картируемые критерии» или «*прокси*»).
3. Отбор и обобщение оцифрованных пространственных данных, наилучшим образом представляющих картируемые геологические параметры; для каждого слоя входных данных диапазон значений в картируемой области нормируется с учетом изменчивости конкретных данных (например, от 1 до 1000) - это могут быть, например, максимумы и минимумы напряженности магнитного поля в пределах картируемой области.
4. Присвоение весовых коэффициентов составляющим наборам исходных данных. Для каждого набора данных весовые коэффициенты от 0 до 1 (аналогично *функции членства в методе нечеткой логики*) присваиваются субъективно, с использованием метода оценки определенности для каждого из следующих трех факторов (табл. 4):

- Важность (I) - отражает общую важность теоретического критерия для рудной системы;
- Применимость (A) - отражает уверенность в том, что картируемый геологический критерий (прокси) отражает ожидаемый процесс, определенный в теоретическом критерии; и
- Достоверность (C) - отражает уверенность в источнике данных с точки зрения пространственного покрытия исследуемой области, точности и общего качества данных.

Табл. 4. Руководство по присвоению коэффициентов важности (I), применимости (A) и достоверности (C), а также оценке определенности по шкале Шермана-Кента.

Численное значение коэффициента	Смысл значения коэффициента	Оценка (уверенность в том, что значение истинно)
1,0	Абсолютное или критическое	Доказано или несомненно достоверно
0,9	Экстремально высокое	Достоверно ожидаемо или уверенно
0,8	Очень высокое	Очень вероятно
0,7	Высокое	Вероятно
0,6	Умеренно высокое	Немного больше, чем равновероятно
0,5	Умеренное	Равновероятно
0,4	Умеренно низкое	Немного меньше, чем равновероятно
0,3	Низкое	Невероятно
0,2	Очень низкое	Возможно, но маловероятно
0,1	Экстремально низкое	Возможно, но весьма сомнительно
0	Отсутствует	Строго недостоверно или невозможно

Три значения весовых коэффициентов важности (I), применимости (A) и достоверности (C) для каждого набора данных затем умножаются, чтобы получить общий весовой коэффициент для этого набора данных. Умножение этого общего веса на нормированные значения (например, максимальное 1000) входного раstra для конкретного набора данных наносится на прогнозную карту, показывающую пространственные изменения значений функции членства в концепции нечеткой логики.

*Нечеткая логика используется для описания нечеткости, которая характеризуется функцией членства. Функцию членства можно определить, как метод решения практических задач на основе опыта, а не знаний. Функции принадлежности представлены графическими формами. По сути, эта операция переводит точные четкие входные значения в лингвистические переменные.*

Некоторым наборам данных, таким как точечные и линейные данные, назначаются дистанционные буферы, которым присваиваются более высокие весовые коэффициенты, чем небуферизованным зонам.

5. Создание общей прогнозной карты на основе промежуточных карт, соответствующих каждому из четырех ключевых компонентов рудной системы. Каждый картируемый



компонент рудной системы представляет собой сумму весовых коэффициентов исходных критериев, нормированных на их количество, и, следовательно, имеет весовой коэффициент от нуля до единицы. Это гарантирует, что каждый из четырех компонентов рудной системы вносит одинаковый вклад в окончательную оценку перспективности независимо от количества исходных критериев. Промежуточные карты четырех компонентов системы затем складываются для создания окончательной карты рудного потенциала. Этот метод представляет собой гибрид методов нечеткой логики и наложения индексов. Последний шаг отражает предположение, что все четыре компонента должны были совпасть во времени и пространстве, чтобы рудная система сформировала крупное рудное месторождение. Нормирование наборов входных данных при создании каждой из четырех промежуточных карт частично смягчает возможное искажение результатов в случае, когда для создания одного из компонентов рудной системы было использовано большее количество наборов входных данных, чем для другого компонента с меньшим количеством наборов входных данных. Альтернативный подход, заключающийся в умножении, а не суммировании результатов четырех промежуточных карт, был опробован в самом последнем исследовании перспективности на IOCG. Однако это пробное исследование дало большие области с нулевыми результатами из-за влияния нескольких наборов входных данных, которые имеют двоичный характер (например, наличие или отсутствие полигонов определенных типов пород). Для более полной проверки подхода, связанного с умножением, необходимы дальнейшие исследования, например, назначение очень низких, а не нулевых значений весовых коэффициентов полигонам, которые не связаны с минерализацией.

**Тип IOCG месторождений: определение, модель рудной системы, критерии.**

Для целей картирования рудного потенциала предлагается обобщенная модель IOCG-рудной системы, основанная на перечисленных выше критериях (рис. 65). Эта модель используется для выявления геологических условий, наиболее благоприятных для формирования не только месторождений IOCG, но и для их модификаций.

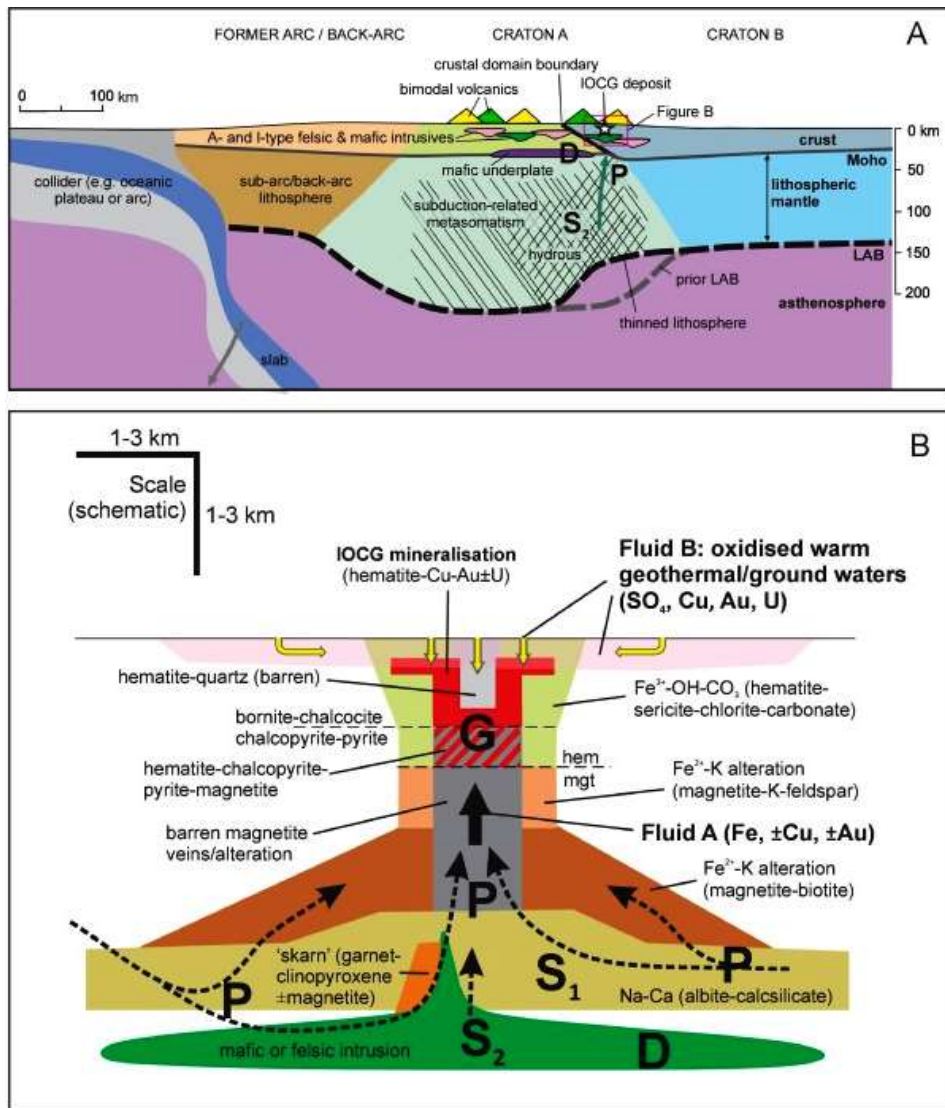


Рис. 65. Модель мультимасштабной рудной системы для IOCG месторождений типа Olympic Dam.  
 A: Разрез рудной системы в масштабе литосферы:  $S_2$  - гипотетическая область источника металла в мантии,  $P$  - траектория распространения магмы и/или растворов из мантии в кору и  $D$  - нижняя часть земной коры/верхняя часть основания мантии как источник энергии рудной системы.  
 B: Схематический разрез IOCG рудной системы в масштабе земной коры/региона, показывающий зональность гидротермальных изменений, минерализации и компонентов рудной системы: альтернативные гипотетические источники металлов и флюидов ( $S_1$  - источник во вмещающих породах,  $S_2$  - магма-гидротермальный источник),  $D$  - источник энергии,  $P$  - траектория движения флюидов и  $G$  - рудообразующие градиенты.

### Модель IOCG рудных систем - теоретические и картируемые критерии.

Модель опирается на основные геологические процессы, теоретические и картируемые критерии для каждого из четырех компонентов рудной системы. Пример набора исходных данных для картирования IOCG-рудного потенциала региона Tennant Creek-Mt Isa (рис. 65 F) показан в таблице 5.

Табл. 5. Типовая схема набора исходных данных для картирования ЮСГ-рудного потенциала (теоретические и картируемые критерии, наборы исходных данных и весовые коэффициенты региона Tennant Creek-Mt Isa).

Компоненты рудной системы	Код критерия	Критерии		Набор(ы) данных	Весовые коэффициенты				Обоснование
		Теоретические	Картируемые		Важность	Применимость	Достоверность	Итоговый вес	
1. Источники металлов, флюидов и лигандов	S1	Немагматические рассолы из вмещающих пород	<i>S1a</i> : карбонатно-силикатные породы	Геологические свойства пород, обогащенных карбонат-силикатами; ASUD	0,8	0,2	0,8	0,128	Карбонатно-силикатные породы могут представлять метаморфические эвапоритовые породы; низкий коэффициент применимости связан с множеством вариантов происхождения карбонатно-силикатных пород
			<i>S1b</i> : эвапоритовые породы; буферной зоны нет	Геологические свойства сульфатных и эвапоритовых породах; ASUD	0,8	0,4	0,8	0,256	В большинстве ЮСГ месторождений очевиден вклад немагматических бассейновых или метаморфических флюидов с влиянием эвапоритов или эвапоритовых морских вод
	S2	Гидротермально-магматический источник рассолов	Кислые изверженные породы I- и A-типов; буферная зона 5 км	Геологические (ASUD) и геохимические данные, используемые для классификации гранитов	0,8	0,4	0,6	0,192	Для некоторых ЮСГ месторождений очевиден вклад флюидов глубинного, вероятно магматического или гидротермально-магматического происхождения
	S3	Магматические (или выщелоченные-изверженные) источники Cu и/или Au и/или S и/или Fe	<i>S3a</i> : основные и ультраосновные изверженные породы (в изобилии); буферная зона 5 км	Геологические свойства пород основного и ультраосновного состава, ASUD	0,8	0,6	0,8	0,384	Наличие изотопов Nd в основных-ультраосновных породах, которые поставляют Cu и/или Au путем выщелачивания или непосредственно из гидротермально-магматических флюидов
			<i>S3b</i> : основные и ультраосновные изверженные породы (немного); буферная зона 5 км		0,8				
	S4	Немагматические	Обогащенные окислами	Гематит-содержащие	0,6	0,7	0,8	0,336	Эмпирическая связь,

Компоненты рудной системы	Код критерия	Критерии		Набор(ы) данных	Весовые коэффициенты				Обоснование
		Теоретические	Картируемые		Важность	Применимость	Достоверность	Итоговый вес	
		Источники Fe: например, железистые кварциты	железа (мета) осадочные породы, в т.ч. железистые кварциты, эпигенетические железистые породы, магнетитовые и гематитовые породы	Породы/или железняки/или железистые кварциты или магнетитовые осадки; ASUD					наблюдаемая между месторождениями типа IOCG и дорудными региональными толщами вмещающих пород, обогащенными оксидами Fe
	S5	Немагматические источники Fe, Cu, Au, K, R3Э, U, и т.д.	Региональные зоны Na- и Na-Ca изменений пород; (буферная зона 20 км)	Геологические свойства пород; натриевые изменения пород; ASUD	0,9	0,5	0,7	0,315	Региональные зоны Na-Ca изменений обеднены Fe, Cu, Au, K, R3Э, U и могут представлять собой источники этих металлов в некоторых или всех месторождениях IOCG
	S6	Магматические (мантийные) источники Cu и/или Au и/или S	Метасоматизированная литосферная мантия	Магнитотеллурические данные проекта AusLamp, мантийная составляющая, зоны высокой проводимости	0,5	0,3	0,7	0,105	Возможный литосферный мантийный источник рудных металлов и серы, но неопределенность связи с месторождениями отражается в низком значении коэффициента применимости
2. источники энергии/движущие силы флюидов	D1	Большие объемы высокотемпературных расплавов земной коры	D1a: кислые интрузивные и вулканические породы типа A и высокотемпературного типа I; буферная зона 10 км	Геологические свойства пород; геохимические данные используемые для классификации; температура насыщения циркона использовалась для подразделения на высокотемпературные (>850 °C, более благоприятные) и низкотемпературные (<850 °C) условия	0,8	0,6	0,4	0,192	Высокотемпературные кислые породы, благоприятные для продвижения флюидов за счет контрастных термических градиентов
			D1b: кислые интрузивные и вулканические породы типа A и высокотемпературного типа I; буферная зона 30 км		0,8	0,4	0,4	0,128	
			D1c: другие I-типы интрузивных пород (буферная зона 10 км)		0,8	0,2	0,4	0,064	
	D2	Основной и ультраосновной (интрузивный и	D2a: основные-ультраосновные интрузивные и	Геологические свойства пород; ASUD; классификации	0,8	0,6	0,8	0,384	Магмы основного состава благоприятны для продвижения флюидов за

Компоненты рудной системы	Код критерия	Критерии		Набор(ы) данных	Весовые коэффициенты				Обоснование
		Теоретические	Картируемые		Важность	Применимость	Достоверность	Итоговый вес	
		экструзивный) магматизм	экструзивные изверженные породы (много); буферная зона 10 км	по Присутствию большого или малого количества компонентов изверженных пород основного состава в пачке					счет контрастных тепловых градиентов
			D2b: основные-ультраосновные интрузивные и экструзивные изверженные породы (немного); буферная зона 10 км		0,8	0,2	0,8	0,128	
			D2c: основные-ультраосновные интрузивные и экструзивные изверженные породы (много); буферная зона 30 км		0,8	0,4	0,8	0,256	
			D2d: основные-ультраосновные интрузивные и экструзивные изверженные породы (немного); буферная зона 30 км		0,8	0,1	0,8	0,064	
	D3	Интрузивные источники тепла основного состава в средней и глубинной коре	Интрузивные комплексы основного состава в земной коре и/или глубже	Картируемые критерии («прокси») для основных изверженных пород в земной коре по данным сейсмической топографии AuSREM, $V_p > 7,1$ км/с выше поверхности Мохо	0,5	0,3	0,4	0,060	Подкоровые вещества основного состава могут представлять собой глубинные источники тепла, приводящие в движение большие объемы флюидов
3. Траектории и структура флюидов	P1	Движение флюидов вдоль проницаемых структур	Разломы; буферная зона 2,5 км	Геологические данные	0,8	0,7	0,5	0,280	Расположение месторождений IOCG контролируется разломами и сдвигами
	P2	Ослабленные зоны земной коры, благоприятные для переноса флюидов и расплавов из мантии в кору	P2a: Границы домена земной коры; буферная зона 75 км (кровля, висячий бок)	* Обновлены по данным Korsch and Doublier (2016) на основе данных сейсмического	1,0	0,8	0,4	0,320	Несколько крупных месторождений IOCG расположены в висячем крыле (кровле) основных границ домена земной коры. Поэтому в висячем
			P2b: Границы домена земной коры; буферная зона 10 км		1,0	0,3	0,4	0,120	

Компоненты рудной системы	Код критерия	Критерии		Набор(ы) данных	Весовые коэффициенты				Обоснование
		Теоретические	Картируемые		Важность	Применимость	Достоверность	Итоговый вес	
			(подошва, лежащий бок)						
	P3	Ослабленные зоны в масштабе литосферы, благоприятные для переноса флюидов и расплавов из мантии в кору	Пограничные зоны литосферных блоков	Мантийный компонент данных AusREM, гороионтальный градиент Vsv	0,8	0,4	0,5	0,160	Рудные IOCG провинции Gawler, Mt Isa и др. глобально расположены на/вблизи окраин литосферных блоков
			Траектории движения флюидов и/или расплавов, картируемые как зоны высокой электропроводности в земной коре	Магнитотеллурические данные AusLamp, коровый компонент; 2D проекция 3D модели	0,5	0,3	0,7	0,105	Несколько крупных месторождений IOCG расположены на вершинах "пальцев" высокой электропроводности в земной коре
	P4								
4. Рудоосаждающие градиенты	T1	Химическое восстановление или окисление, или десульфидизация рудных флюидов оксидами железа	T1a: до- или синрудные железоксидные породы	Геологические данные; ASUD; обогащенные железом породы	0,5	0,4	0,6	0,120	Магнетит и гематит могут обеспечить сильные окислительно-восстановительные и сернистые градиенты для осаждения Cu-Au (как до-так и син-IOCG); наличие гематита более благоприятно для IOCG типа Olympic Dam
			T1b1: Породы, обогащенные магнетитом – магнитная восприимчивость (>0,030SI) и плотность (>2,80 г/см <sup>3</sup> )	Инверсионная 3D-модель магнитных и гравитационных данных; данные по магнетиту и гематиту моделируются отдельно, а затем проецируются на 2D-поверхность	1,0	0,6	0,5	0,300	
			T1b2: Породы, обогащенные магнетитом – магнитная восприимчивость (0,026–0,030SI) и плотность (>2,80 г/см <sup>3</sup> )		1,0	0,5	0,5	0,250	
			T1b3: Породы, обогащенные магнетитом – магнитная восприимчивость (0,022–0,026SI) и плотность (>2,80 г/см <sup>3</sup> )		1,0	0,4	0,5	0,200	
			T1b4: Породы, обогащенные		1,0	0,3	0,5	0,150	

Компоненты рудной системы	Код критерия	Критерии		Набор(ы) данных	Весовые коэффициенты				Обоснование				
		Теоретические	Картируемые		Важность	Применимость	Достоверность	Итоговый вес					
			магнетитом – магнитная восприимчивость (0,018–0,022SI) и плотность (>2,80 г/см <sup>3</sup> )										
			<b>Т1с1:</b> Породы, обогащенные гематитом – низкая магнитная восприимчивость (<0,01SI) и плотность (>2,85 г/см <sup>3</sup> )							1,0	0,8	0,5	0,400
			<b>Т1с2:</b> Породы, обогащенные гематитом – низкая магнитная восприимчивость (<0,01SI) и плотность (2,84–2,85 г/см <sup>3</sup> )							1,0	0,7	0,5	0,350
			<b>Т1с3:</b> Породы, обогащенные гематитом – низкая магнитная восприимчивость (<0,01SI) и плотность (2,83–2,84 г/см <sup>3</sup> )							1,0	0,6	0,5	0,300
			<b>Т1с4:</b> Породы, обогащенные гематитом – минимум магнитной восприимчивости (<0,01SI) и плотности (2,82–2,83 г/см <sup>3</sup> )							1,0	0,5	0,5	0,250
	<b>T2</b>	Химический восстановительный градиент - восстановление или окисление рудных флюидов поперек гематитово-магнетитовой зональности	Пространственное пересечение между <b>T1c</b> гематитовыми и <b>T1b</b> магнетитовыми проектными площадями (с буферными зонами размером 500 м каждая)	Инверсионная 3D-модель магнитных и гравитационных данных; буферизованный контакт между магнетитом и гематитом; проекция на 2D-поверхность	1,0	0,9	0,5	0,450	Окислительно-восстановительный градиент на переходе от магнетитовой к гематитовой зоне является наиболее благоприятным местом для формирования месторождений Cu-Au типа Olympic Dam				
	<b>T3</b>	Физико-химические градиенты – изменение pH и/или уменьшение температуры/давления	Калиевый изменения (кпш, биотит, серицит)	Геологические данные; ASUD; натриевые изменения пород	0,9	0,7	0,5	0,315	Калиевые изменения типичны для большинства рудных зон типа IOCG (на больших глубинах КПШ и биотит, на более мелких - серицит), кроме того, некоторые региональные				

Компоненты рудной системы	Код критерия	Критерии		Набор(ы) данных	Весовые коэффициенты				Обоснование
		Теоретические	Картируемые		Важность	Применимость	Достоверность	Итоговый вес	
									изменения (например, биотит); могут Представлять градиенты рН или температуры
	<b>^T4</b>	Физико-химические градиенты – уменьшение температуры/давления и/или изменение рН	Хлорит-серицит-карбонатные изменения	Геологические данные; ASUD; хлоритовые изменения пород	0,7	0,2	0,3	0,042	Хлорит-серицит-карбонатные изменения типичны для верхнекоровых уровней ЮСГ систем; могут представлять градиенты рН или другие градиенты
	<b>^T5</b>	Химические градиенты – восстановление	Карбонатные породы	Геологические данные; ASUD; карбонатные породы	0,9	0,7	0,5	0,315	Восстановленный углерод может выступать в качестве восстановителя для окисленных меднозолотоносных-рудных флюидов
	<b>^T6</b>	Химические градиенты – восстановление, и/или локальный источник серы	Сульфидированные породы	Геологические данные; сульфидные породы	0,9	0,7	0,5	0,315	Ранее существовавшие сульфидные минералы могут вызывать восстановление флюидов и, следовательно, дестабилизировать С1-комплексы металлов
	<b>^T7</b>	Физико-химические градиенты – термобарические градиенты в верхних частях системы, в зонах разгрузки	Кремниевые изменения эпитепимального типа; глинистые изменения; ураноносные зоны	Геологические данные по обнажениям пород; геохимические данные; гиперспектральные данные; радиометрические данные (высокое значение U/Th)					Сильное понижение температуры и давления при резких градиентах (например, вблизи поверхности) может привести к осаждению сульфидов, оксидов и кремнезема



### *Источники металлов, флюидов, лигандов и серы – критерии.*

Существенным процессом в формировании любого гидротермального месторождения является перенос рудных металлов от источника к месту их осаждения. Этот процесс обычно включает выделение металлов из магмы в сосуществующие с ней гидротермально-магматические флюиды или выщелачивание металлов из исходных пород в мигрирующие через них растворы. Рудные металлы обычно переносятся в растворе в виде комплексов с участием лигандов, таких как Cl, HS, F, OH, PO<sub>4</sub><sup>2-</sup> или металлоорганических комплексов. При образовании сульфидных минералов сера может переноситься в том же растворе, что и металлы, или в разных гидротермальных растворах, либо может присутствовать в породах на месте отложения руд. Отложение руд происходит там, где комплексы металлов дестабилизируются в результате изменений химического состава раствора или изменений температуры или давления - физико-химические градиенты.

Источники рудных металлов (Cu, Au, U, Ag, РЗЭ), железа, серы и рудных флюидов (включая лиганды) представляют собой один из наиболее спорных аспектов генезиса IOCG месторождений. Одна точка зрения заключается в том, что рудообразующие гидротермальные флюиды, представляли собой бассейновые рассолы в основном эвапоритового происхождения и выщелачивали металлы вдоль траектории движения потоков в магматических гидротермальных системах как на месторождениях Kiruna (хотя, оно и не относится к типу IOCG) и Olympic Dam, а также на некоторых месторождениях в рудном районе Cloncurry и Salton Sea (Калифорния). Другие авторы описывают некоторые месторождения, такие как Olympic Dam, Candelaria (Чили) и месторождения рудной провинции Carajás, как гидротермально-магматические, что подразумевает флюиды и рудные металлы магматического происхождения. Кроме того, предложены двух-флюидные модели, включающие «глубинные» флюиды гидротермально-магматического или метаморфического происхождения, которые смешиваются с метеорными/подземными водами или другими немагматическими флюидами и прогревают их.

При моделировании учитывалась как гидротермально-магматические, так и немагматические источники жидкостей и металлов (рис. 65, S<sub>1</sub> и S<sub>2</sub>). Этот подход также имеет преимущество в картировании перспективных площадей на тип IOCG независимо от того, какая генетическая модель является предпочтительной. В частности, в сценарии с немагматическими флюидами и металлами предполагается, что флюиды из глубинных источников представляют собой рассолы диагенетического или метаморфического происхождения, поступающие из эвапоритных бассейнов (или их метаморфизованных эквивалентов). Этот сценарий включен в моделирование рудного потенциала в качестве

теоретического критерия  $S_1$  (табл. 5). Такое происхождение немагматических флюидов согласуется с данными о соотношении стабильных изотопов и галогенов для жидких включений в некоторых IOCG провинциях. Картируемые критерии («прокси») представляют собой эвапоритовые (или экс-эвапоритовые или скаполитовые) породы, а также изменения, происходящие при реакции рассолов эвапоритового происхождения с вмещающими породами, такие как зоны известково-кварцевых изменений, которые обычно сопровождают (или встраиваются) в региональные зоны Na-Ca изменений в гидротермальных системах IOCG. Этот немагматический сценарий также включает выщелачивание металлов вдоль траектории потока флюидов внутри бассейнов из кислых и/или основных магматических пород (рис. 65,  $S_1$ ). Проявления процессов выщелачивания металлов (например, Fe, Cu) наблюдаются в региональных зонах натриевых-кальциевых изменений в нескольких IOCG провинциях (Curnamona, рудный район Cloncurry, магматическая зона Great Bear и др.). Кроме того, некоторые данные об изотопах меди на нескольких небольших месторождениях типа IOCG в магматической зоне Great Bear, говорят о немагматических коровых источниках меди.

Данные по изотопам неодима для месторождения Olympic Dam согласуются либо с выщелачиванием неодима (и, следовательно, меди, которая изменяется вместе с Nd) из основных/ультраосновных пород, либо с поступлением Nd (и Cu) непосредственно из основных/ультраосновных магм. При формировании месторождений типа IOCG в рудном районе Kiruna на основании данных изотопов Nd предполагается, также, выщелачивание РЗЭ и Cu из вмещающих пород. Кроме того, есть предположение, что содержание урана в IOCG месторождениях связано с его содержанием в неизмененных вмещающих породах, как и должно быть, если уран поступает в результате выщелачивания богатых ураном вмещающих пород, таких как кислые гранитоиды. Соответственно, для сценария с немагматическими источниками металлов (теоретические критерии  $S_4$ ,  $S_5$ , табл. 5) картируемыми критериями («прокси») являются богатые железом (мета)осадочные породы и региональные зоны натриево-кальциевых изменений. Критерий  $S_3$ , подразумевающий происхождение металлов из основных/ультраосновных магматических пород, может включать либо немагматические флюиды, выщелачивающие металлы, либо гидротермально-магматические флюиды.

Гидротермально-магматическое происхождение месторождений типа IOCG подразумевает, что источником рудных флюидов и металлов являются магмы (Рис. 4,  $S_2$ ). По-видимому, существует два подтипа месторождений IOCG: один, который встречается в континентальных окраинах дуг андского типа, и другой, который обычно располагается вдали от таких окраин в континентальных или в «удаленно-задуговых» условиях.

Месторождения типа IOCG в континентальных окраинах включают в себя мезозойские месторождения в Чили и Перу, такие как Candelaria, Manto Verde, Mina Justa и Raúl Condestable, и небольшие месторождения в раннепротерозойской магматической зоне Great Bear в Канаде (Sue Dianne). В этих провинциях обычно существует тесная пространственная и временная связь между IOCG месторождениями и магматическими интрузиями, как правило, среднего состава от кварц-диоритов/монцодиоритов до пошонитов. В этих условиях распространены также IOA месторождения, которые могут быть генетически связаны с подтипом IOCG месторождений, приуроченным к магматическим дугам, в пределах обстановок с характерными изменениями пород. Напротив, IOCG месторождения второго подтипа, которые являются, главным образом, докембрийскими, редко однозначно связаны с "материнскими" магматическими телами, расположенными внутри или рядом с месторождениями, несмотря на то, что региональный магматизм часто является равновозрастным. Сильно измененные основные/ультраосновные дайки на месторождении Olympic Dam могут быть одним из редких примеров "материнских" интрузий в пределах IOCG месторождения, хотя обе модели (выщелачивание металлов и гидротермально-магматическая) являются приемлемыми. Региональный магматизм в IOCG провинциях, расположенных в пределах удаленной задуговой части во внутриконтинентальной среде, характеризуется обычно развитыми кислыми магматическими породами типа А и/или высокотемпературными типа I. В некоторых, если не во всех этих удаленно-задуговых/внутриконтинентальных IOCG условиях в меньших количествах присутствуют одновозрастные основные интрузивные±вулканические породы, что, вероятно, свидетельствует о бимодальном магматизме.

Данная модель разработана для протерозойских и архейских террейнов Австралии на основе второго, в основном докембрийского задугового/внутриконтинентального IOCG подтипа. Соответственно, обобщенные выше эмпирические связи требуют, чтобы теоретические критерии для магматического сценария включали комбинацию основных/ультраосновных и кислых (а не средних) магм А- и I- типов в качестве источников рудных металлов и флюидов (теоретические критерии S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, табл. 5). Однако следует еще раз подчеркнуть, что детали эволюции гидротермально-магматических флюидов в петрогенезе основных/ультраосновных и кислых магм А-типа и высокотемпературных магм I-типа остаются плохо изученными в отношении IOCG месторождений.

В масштабах земной коры и литосферы источники рудных металлов еще менее ограничены. Предполагается, однако, что метасоматизированная литосферная мантия или

водные кумуляты нижней коры могут накапливать концентрации халькофильных элементов, таких как Cu, Au и платиноиды, вместе с серой, готовые для последующего извлечения и переноса в верхнюю кору с образованием гидротермально-магматических Cu-Au и других месторождений. Новейшие геофизические данные подтверждают эту гипотезу – магнитно-теллурические исследования в кратоне Gawler выявили зоны относительно высокой электропроводности, расположенные непосредственно под Olympic Dam и другими IOCG месторождениями и простирающиеся вниз через кору и до верхней мантии. Показано, что обширная зона повышенной электропроводности в средней части литосферной мантии центрально-восточного кратона Gawler может представлять собой метасоматизированную литосферную мантию. Обширные зоны повышенной электропроводности были выявлены, также, в коре под IOCG месторождением Ernest Henry в рудном районе Cloncurry штата Квинсленд и в верхней мантии к востоку от него. Новейшие данные свидетельствуют о наличии пространственной связи между метасоматизированной мантией и IOCG месторождениями в провинции Olympic и рудном районе Cloncurry. Хотя эта связь, по-видимому, относится к поступлению из мантии в верхнюю кору основных/ультраосновных магм, остается неясным, являются ли такие магмы непосредственными источниками флюидов и металлов или же металлы были выщелочены из основных/ультраосновных магматических пород. Несмотря на это, зоны аномальной электропроводности в литосферной мантии представляют собой возможные глубинные источники рудных металлов и/или флюидов для формирования IOCG месторождений (рис. 65А, S<sub>2</sub>). Эти связанные с мантией магматические процессы и картируемые критерии («прокси») заключены в рамки теоретического критерия S<sub>6</sub> (табл. 5).

В обеих описанных выше моделях формирования IOCG (немагматической и гидротермально-магматической) устанавливается глубинное происхождение рассолов (А), тем не менее имеется большое количество жидких включений и стабильных изотопов, свидетельствующих о присутствии во многих IOCG месторождениях вторичных окисленных нагретых метеорных или подземных вод (В) (рис. 65В). Наблюдаемые геологические признаки В-флюидов включают: гематитизацию магнетита; наличие сохранившихся вулканических или осадочных пачек, близких по возрасту к IOCG месторождениям, и низкотемпературные гидролитические изменения (серицит, хлорит, глина). В идеале моделирование рудного потенциала должно включать теоретические критерии для В-флюидов как источника флюидов рудной системы. Однако в действительности картирование источников поверхностных или приповерхностных флюидов, поступающих из земной коры, особенно в отсутствие обнажений, представляет

определенные трудности. Такие критерии, как гематитизация магнетита и хлорит-серицитовые изменения были учтены как рудообразующий градиент рудной системы ( $T_1 - T_4$ , табл. 5).

***Источники энергии - теоретические и картируемые критерии.***

Считается, что основными источниками энергии, приводящей в действие гидротермальные системы, являются основные/ультраосновные и кислые магмы, формирующие IOCG-месторождения (рис. 65, D). С учетом региональных ассоциаций кислых магматических пород типов «А» и «I» с IOCG месторождениями в главных докембрийских IOCG провинциях, эти высокотемпературные варианты гранитов являются более вероятными источниками тепла, чем более низкотемпературные гранитные расплавы типа «S». Основные или ультраосновные интрузивные породы представляют собой вероятные движущие силы потока жидкости в связи с относительно высокими температурами магмы. Внедрение в верхние части коры более эффективно для создания очень высоких геотермальных градиентов, управляющих высокотемпературными потоками, по сравнению с более глубинными частями.

Теоретический критерий  $D_1$  (табл. 5) определяется как большие объемы высокотемпературных расплавов коры. Картируемые критерии («прокси») представляют собой высокотемпературные кислые интрузивные и вулканические породы типов «А» и «I», которые являются более благоприятными, если являются частью бимодальных комплексов. Теоретическим критерием  $D_2$  являются основные или ультраосновные магмы с соответствующими картируемыми критериями в виде основных/ультраосновных интрузивных и вулканических пород, если они также являются частью бимодальных комплексов. Третий теоретический критерий  $D_3$  описывает более глубинные источники тепла в коре. Картируемые критерии («прокси») этих крупных «следов» IOCG-рудных систем - это основные/ ультраосновные интрузивные комплексы в средней и глубинной частях коры.

***Структура и траектории потока - теоретические и картируемые критерии.***

Структура рудной системы - это геометрическое расположение основных ее элементов и, в частности, траектории флюидов/магм, которые соединяют источники металла и флюидов с местами рудоотложения.

В региональном масштабе, а также в масштабах рудных районов и месторождений для фокусировки и локализации флюидов, связанных с IOCG месторождениями, важны системы разломов второго, третьего и более высоких порядков, что видно из расположения месторождений и изменений пород на пересечениях таких структур или в изменении вязкости растворов вдоль зон разломов/сдвигов, например, рудные районы

Cloncurry и Tennant Creek. Траектории потока флюидов в верхней части коры представляют теоретический критерий  $P_1$ , а картируемые критерии («прокси») - это зоны разломов и сдвигов регионального и локального масштабов, выявленные в результате геологического картирования или геофизических исследований (табл. 5).

Структурный контроль важен на ЮСГ месторождениях (рис. 65, траектории P). Данные сейсморазведки по региону Olympic Dam, показали, что это сверхгигантское месторождение расположено на границе между архейским и протерозойским висячими блоками земной коры. Магнитотеллурические данные отображающие различную электропроводность в этой пограничной зоне, подтвердили наличие крупной границы земной коры. Аналогичная структура наблюдается в рудном районе Cloncurry, где ЮСГ месторождение Ernest Henry расположено на границе между висячими блоками земной коры. В обоих случаях ЮСГ месторождения расположены над ступенями границы Мохо (рис. 65A). Расположение всех основных ЮСГ месторождений тесно связано с краевыми частями кратонов. Это подтверждается по данным сейсморазведки, а также магнитотеллурическими, геохимическими и Nd-изотопными данными. Причины этой эмпирической связи не до конца понятны, но такие транс-литосферные и транс-коровые структуры могут представлять собой реологически слабые зоны, которые могут быть реактивированы в первую очередь и, таким образом способствовать переносу расплавов из мантии через кору и/или способствовать движению гидротермальных потоков. Кроме того, висячие блоки транс-литосферных пограничных зон в некоторых случаях могут представлять собой швы, над которыми может развиваться связанный с субдукцией метасоматоз литосферы. Процесс транс-корового переноса магм и гидротермальных флюидов отнесен к теоретическим критериям  $P_2$  и  $P_4$ , а транс-литосферный перенос - к критерию  $P_3$  (табл. 5). Соответствующими картируемыми критериями являются пограничные зоны между блоками земной коры ( $P_2$ ) и литосферы ( $P_4$ ), а также траектории движения флюидов через земную кору ( $P_3$ ), которые могут быть откартированы с помощью геофизических, геохимических и изотопных методов.

Критерий  $P_4$  основан на магнитотеллурических данных, полученных в рудных районах Gawler Craton и Cloncurry, которые показывают, что субвертикальные «пальцы» коры с аномально высокой электропроводностью присутствуют непосредственно под основными ЮСГ-рудообразующими системами. Существует соответствие «пальцев» с пониженной сейсмической отражательной способностью и объемами плотных и магнитных пород (например, богатых магнетитом, и/или пород основного состава), простирающимися на глубину  $>5$  км. Соответственно, зоны высокой электропроводности в коре интерпретируются как траектории, по которым происходит перенос флюидов и/или

металлов, и/или магм к IOCG месторождениям в рудных районах Gawler Craton и Cloncurry.

***Рудоосаждающие градиенты - теоретические и картируемые критерии.***

Анализы газово-жидких включений показывают, что высокотемпературные (>400°C) рассолы, из которых выпадают в осадок обогащенные магнетитом комплексы, могут содержать процентные концентрации железа и более 500 г/т меди, а также высокие концентрации Zn, Pb, Ba, As, K и Ca. Для формирования крупных IOCG месторождений с богатой рудой необходимы другие процессы и/или флюиды - это процессы смешивания флюидов или наложения вторичных окисленных рассолов. Все более крупные и богатые месторождения провинции Olympic обогащены гематитом с аномально высокими содержаниями U, PЗЭ, F и Ba. Более высокая степень минерализации обычно приурочена к окислительно-восстановительному градиенту между восстановительными магнетитсодержащими комплексами и обогащенными гематитом окислительными комплексами (Рис. 65В, G). Альтернативная интерпретация этих взаимоотношений заключается в том, что окисленные рудные растворы восстанавливаются при взаимодействии с железистой породой, что приводит к формированию золотомедных месторождений. Этот механизм также может привести к формированию богатой руды вдоль границы между комплексами, обогащенными магнетитом, и немагнитными комплексами с преобладанием гематита.

Теоретический критерий для этого компонента рудной системы, определяется как процесс изменения химических условий и/или термобарического режима рудоносных гидротермальных флюидов, приводящий к осаждению руды. Этот общий критерий разделен на несколько теоретических подкритериев в зависимости от физико-химического механизма; например, процесс восстановления окисленных рудных растворов различными восстановителями (Т<sub>1</sub>, Т<sub>2</sub>, Т<sub>5</sub>, Т<sub>6</sub>, табл. 5), что отличается от процесса изменения рН рудных растворов (Т<sub>3</sub>) и от изменений термобарического режима (Т<sub>7</sub>). Такое разделение критериев частично предназначено для облегчения отдельного картирования критериев, но следует признать, что многие из этих процессов в естественных системах будут действовать одновременно.

Соответствующие картируемые критерии представляют собой физико-химические градиенты, такие как: пространственные изменения относительного содержания оксидов железа от магнетита до гематита (представляющие собой переход от промежуточных или восстановительных к окислительным состояниям соответственно); и присутствие углеродистого вещества или ранее существовавших сульфидных минералов (потенциальных восстановителей для окисленных рудных флюидов) во вмещающих

породах. Картирование градиента перехода от магнетита к гематиту может быть достигнуто с помощью инверсионного моделирования данных грави- и магниторазведки, как показано для провинции Olympic. Градиенты перехода от магнетита к гематиту могут представлять также температурные градиенты, например, вызванные смещением более горячих и холодных флюидов или простым адиабатическим охлаждением восходящих флюидов.

Другие картируемые критерии, представляющие изменения химического состава рудных флюидов, включают изменения рН, например, при переходе от пород, обогащенных калишпатом, к серицитовым изменениям (то есть от более высокого к более низкому рН; критерии T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub>, табл. 5), как на месторождении Olympic Dam. Однако следует отметить, что переход от калишпатовых к серицитовым изменениям может быть также связан с понижением температуры в присутствии воды.

Картируемым критерием, широко представляющим сильный термобарический градиент, является наличие кремниевых эпитермальных изменений (T<sub>7</sub>, табл. 5), показатель условий приповерхностного кипения в некоторых IOCG провинциях.

### **Исходные наборы данных: регион Tennant Creek – Mt Isa**

Как и во многих IOCG провинциях, минерализация в рудном районе Tennant Creek (рис. 62 F) изменяется от восстановленных пирротин-магнетит-содержащих комплексов до магнетит-пиритовых и окисленных гематитовых. Выявленные здесь месторождения Au-Cu-Bi относительно небольшие, но с богатой рудой, приуроченной к массивным гидротермальным эпигенетическим железистым породам, обогащенным магнетитом и/или гематитом в пределах слабо метаморфизованных нарушенных пачек граувакк-алевролит-сланцевых пород, возраст которых составляет ~1865-1860 млн лет. Отсутствие региональных Na-Ca изменений, очень высокие содержания Au (56 г/т на месторождении Juno) без значительного содержания меди и осаждение оксидов железа, парагенетически предшествующее осаждению оруденения позволяет предположить, что объекты района Tennant Creek не являются в полном смысле IOCG месторождениями.

### ***Исходные данные - источники металлов, флюидов и лигандов***

Для модели немагматической рудной системы (включая выщелачивание осадочных и/или магматических пород) некоторые из наборов входных данных получены в результате переинтерпретации геологических данных о среднепротерозойских породах в некоторых частях северной Австралии. Например, критерий S<sub>1</sub> источник немагматического рассола, представлен геологическими породами, которые в стратиграфической базе данных Австралии (ASUD) описаны как содержащие



эвапоритовые минералы (например, «курчавый» роговик; псевдоморфозы по эвапоритовым минералам; скаполит). Источники Fe в немагматической модели представлены изверженными породами основного состава и породами, обогащенными железом возраста более 1800 млн лет (критерии S<sub>3</sub>, S<sub>4</sub>), например, формацией Warramunga, которая местами содержит мелко вкрапленный магнетит и «гематитовые сланцы». Зоны натриевых и Na-Ca изменений представляют собой источники выщелачивания металлов, таких как Fe, Cu и Au; такие зоны Na-Ca изменений могут представлять известково-силикатные породы из массива геологических данных (критерий S<sub>5</sub>), но им был присвоен относительно низкий весовой коэффициент «применимости», равный 0,5, отражающий вероятность многочисленных ложноположительных результатов (т.е. карбонат-силикатов, которые не представляют собой зоны выщелачивания металла). Натриевые изменения также могут быть отображены с помощью геохимических данных и, косвенно, с помощью аэrorадиометрических данных (например, очень низкие значения K/Th из-за обратной корреляций между Na и K в зонах натриевых изменений в гидротермальных IOCG-системах. Однако применимость обоих этих последних наборов данных для определения точек опробования или обнаженных участков ограничена. Чтобы минимизировать смещение из-за неравномерного распределения пространственных данных, не использовали геохимические или радиометрические данные непосредственно при картировании рудного потенциала в районе Tennant Creek-Mt Isa. Тем не менее, эти данные могут быть использованы путем наложения на окончательные результаты при определении приоритетных областей с высокой перспективностью в ранее опробованных или обнаженных участках.

Магматические породы основного состава представляют собой источники Fe, Cu и Au как в немагматической, так и гидротермально-магматической моделях (критерий S<sub>3</sub>). Входные данные получены из геологических баз данных; для интерпретации скрытых магматических пород основного состава возраста более 1800 млн лет использовались, аэромагнитные и гравитационные, а также любые другие доступные данные (например, данные по скважинам, геохронологические данные). Инверсия гравитационных и магнитных данных также привела к выявлению многочисленных тел с повышенной плотностью и магнитной восприимчивостью в исследуемом регионе, некоторые из которых могут представлять собой скрытые магматические породы основного состава, тогда как другие могут быть обогащены магнетитом и/или гематитом. Однако, как правило, из-за перекрывающихся значений свойств пород трудно бывает различить, что является источником гравитационно-магнитных аномалий - магматические породы основного состава или железоксидные минералы. Тем не менее, сильные магнитно-

гравитационные аномалии, связанные с высоким содержанием оксида железа можно отличить от большинства основных магматических пород, поэтому были использованы только такие аномалии (табл. 5, критерии T1b, T1c).

Для гидротермально-магматической модели источниками флюидов и металлов являются кислые и основные магматические породы, картируемые с использованием выборок из данных по породам древнее 1800 млн лет (критерии S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>). В частности, по аналогии с другими крупными IOCG провинциями в качестве входных данных были выбраны кислые интрузивные и вулканические породы древнее 1800 млн лет типа А и высокотемпературного типа I. Геохимическая классификация была проведена с использованием базы данных Geoscience Australia путем оценки температуры кристаллизации на основе термометрии насыщения для циркона. В регионе Tennant Creek известно мало кислых магматических пород А-типа; все магматические вулканические породы до 1800 млн лет относятся к I-типу, включая интрузивные породы свиты Tennant Creek и вулканические породы группы Ooradidgee.

При предыдущих ГИС-построениях рудного потенциала магнитотеллурические данные не использовались. В данном построении магнитотеллурические аномалии электропроводности в литосферной мантии были включены в качестве благоприятных источников рудных металлов (рис. 65А, S<sub>2</sub>; таблица 5, критерий S<sub>6</sub>). Несмотря на то, что пространственные корреляции между проводящими зонами в мантии и IOCG месторождениями являются убедительными, существует значительная неопределенность в понимании прямых или косвенных генетических связей. По этой причине весовые коэффициенты «применимости» для этого входного критерия S<sub>6</sub> были установлены относительно низкими на уровне 0,3 (таблица 5). Этот входной слой был создан путем проецирования на дневную поверхность максимальных значений электропроводности между глубиной 100 км (основание 3D-модели) и поверхностью Мохо и распределения результатов по четырем ячейкам.

#### ***Исходные данные - движущие силы и источники энергии.***

Исходные данные, представляющие движущие силы и источники энергии IOCG-рудообразующих систем, представляют собой карты кислых и основных магматических пород возраста более 1800 млн лет (критерии D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>). Основные магматические породы и кислые магматические породы типа «А» и высокотемпературного типа «I» предпочтительнее других кислых магматических пород из-за предполагаемого большего содержания тепла в их материнских магмах и, следовательно, способности приводить в движение гидротермальные системы путем термического воздействия. Кроме того, более высокие весовые коэффициенты могут быть присвоены тем кислым и основным

магматическим породам, которые составляют части бимодальных свит, поскольку эта комбинация представляет геологические среды с высоким термальным градиентом и, следовательно, повышенную способность приводить в движение крупные гидротермальные системы.

Третий набор входных данных получен из данных пассивной сейсмологии, которые показывают изменения скорости сейсмических волн в литосфере. В общих чертах, высокоскоростные домены внутри коры представляют собой плотные породы, которые могут включать в себя магматическое вещество основного состава.

Соответственно, рассчитали общую мощность горных пород с  $V_p > 7,1$  км/с в пределах коры австралийского континента, используя модель скорости распространения сейсмических волн в земной коре AusRem (критерий D<sub>3</sub>). Тот же набор данных использовался при оценке магматического Ni-Cu-MPP-потенциала в континентальном масштабе. При этом было показано, что большая часть вещества основного состава находится вблизи основания коры и/или в верхней мантии. Считается, что эти домены основного состава представляют собой изверженные интрузивные комплексы мантийного происхождения, которые могут приводить в движение крупные гидротермальные IOCG (или другие) системы в средней и верхней частях коры (рис. 65А). Из-за очень большого расстояния между точками измерения данных пассивной сейсмологии (несколько сотен километров) и неопределенностей в положении, возрасте и петрологических источниках этих данных, критерию D<sub>3</sub> присвоены низкие весовые коэффициенты «применимости» и «достоверности» (0,3 и 0,4 соответственно).

#### ***Исходные данные - структура и траектории.***

Во исходных наборах данных этого типа представлены структура и траектории трех масштабов: приповерхностные разломы, крупные разрывы в масштабе земной коры и границы в масштабе литосферы. Приповерхностные разломы (критерий P<sub>1</sub>) были взяты из геологической базы данных и представляют собой системы разломов 1-го, 2-го и более высоких порядков, которые были получены при геологическом картировании поверхности и интерпретации аэромагнитных и гравитационных данных. Для критерия P<sub>2</sub> исходной является 3-мерная карта границ доменов земной коры Австралии, представленная в виде 2-мерного набора линий, где границы пересекают среднепротерозойскую поверхность фундамента. К этому набору данных была добавлена граница домена в масштабе земной коры на основе повторно обработанных и интерпретированных данных сейсмического зондирования района Tennant Creek (критерий P<sub>2</sub>). Падение на юг построено по данным сейсмического отражения, при этом граница, пересекающая поверхность Мохо, находится рядом с местом, где ранее с помощью пассивной сейсморазведки была выявлена ~ 10-

километровая ступень поверхности Мохо. На основании геометрии основных границ земной коры и IOCG месторождений в рудных районах Gawler Craton и Cloncurry кровле (висячим крыльям) этой и других основных границ земной коры была назначена буферная зона в 75 км с весовым коэффициентом «применимости» 0,8, а лежащим крыльям (подошве) присвоена 10-километровая буферная зона с более низким весовым коэффициентом «применимости» - 0,3 (критерии P<sub>2a</sub>, P<sub>2b</sub>, таблица 5). Этот коридор широтного простирания является одним из ключевых факторов, контролирующих перспективность тех или иных областей исследуемого региона на месторождения типа IOCG.

Слабые зоны литосферного масштаба (критерии P<sub>3</sub> и P<sub>4</sub>) отображаются в двух наборах данных. Во-первых, пограничные зоны литосферных блоков (P<sub>3</sub>) были нанесены путем расчета положений максимальных горизонтальных градиентов сейсмической скорости (Vs) в пределах литосферной мантии (то есть между границей литосфера-астеносфера и Мохо). Хотя такие границы считаются очень важными для контроля местоположения крупных рудных месторождений (отсюда вес «важности» 0,8), вес «применимости» и «достоверности» относительно низок (0,4 и 0,5 соответственно), поскольку разрешающая способность сейсмической томографии позволяет различать отдельные элементы размером не менее ~ 300 км по горизонтали и ~ 25–50 км по вертикали. Во-вторых, магнитотеллурические данные использовались для отображения критерия P<sub>4</sub>, ослабленных зон земной коры. Входной слой был создан путем проецирования на поверхность максимальных значений электропроводности между Мохо и поверхностью и квантования (распределения) результатов по четырем ячейкам. Этот критерий представляет собой траектории прохождения флюидов и/или расплавов через кору.

#### ***Исходные данные - градиенты рудообразования.***

Исходные наборы данных, отображающие компонент «градиенты рудообразования» (или «ловушки») рудной системы, получены из четырех источников: геологическая база данных, результаты инверсии магнитных и гравитационных данных, геохимические данные и гиперспектральные данные. Входные слои на основе массива геологических данных, включают: богатые железом породы (критерий T<sub>1a</sub>), калиевые (T<sub>3</sub>) или серицит-хлоритовые изменения пород (T<sub>4</sub>), углеродистые породы (T<sub>5</sub>) и сульфидные породы (T<sub>6</sub>), представляющие возможные химические окислительно-восстановительные, сернистые или рН градиенты и/или градиенты температуры и давления.

Входные данные для картирования оксидов железа также были созданы путем трехмерного инверсионного моделирования аэромагнитных и гравитационных данных (критерии T<sub>1b</sub>, T<sub>1c</sub>, T<sub>2</sub>). Этот метод позволяет различать плотные магнитные источники,

такие как богатые магнетитом породы (возможно, гидротермального, осадочного или магматического происхождения) и/или интрузивные тела основного состава, и плотные породы с низкой магнитной восприимчивостью, такие как породы, богатые гематитом или сульфидами, или некоторые карбонат-силикатные породы. Поскольку гематитизация магнетита является весьма благоприятным химическим градиентом для рудообразования зоны контакта между смоделированными «магнетитовами» и «гематитовыми» телами были включены в картирование IOCG-перспективности. Наборы входных данных для критериев T<sub>1b</sub>, T<sub>1c</sub> и T<sub>2</sub> были созданы в виде 2-мерных карт путем проецирования 3-мерных объемов на поверхность среднепротерозойского фундамента.

Радиометрические и гиперспектральные данные дистанционного зондирования (Aster), а также поверхностно-геохимические (почвенно-геохимические) данные представляют собой отклики на поверхности, поэтому их можно эффективно использовать для картирования минералогических и геохимических изменений. Эти данные потенциально полезны в случаях, когда искомые породы выходят на поверхность, но в тех областях, где они скрыты под чехлом мощностью от нескольких сантиметров или более, возможности их использования ограничены. Из-за наличия обширных областей относительно молодых бассейнов, перекрывающих протерозойские породы в регионе Tennant Creek–Mt Isa, радиометрические и гиперспектральные данные не использовались при картировании перспективности на тип IOCG. Тем не менее, мы предлагаем, чтобы критерии T<sub>4</sub>–T<sub>7</sub> и связанные с ними наборы входных данных, перечисленные в Таблице 5, могли бы использоваться в будущем в качестве наложений на результаты оценки перспективности для определения приоритетов областей с высоким потенциалом.

### **Результаты минерагенического картирования и его значение для ГРР.**

Результаты исследований рудного потенциала Geoscience Australia представлены ниже в хронологическом порядке их проведения, иллюстрируя эволюцию метода минерагенического картирования.

#### ***IOCG-рудный потенциал района Northern Queensland***

Полученные результаты определили ряд площадей в восточной части района как весьма перспективные для IOCG месторождений (рис. 66).

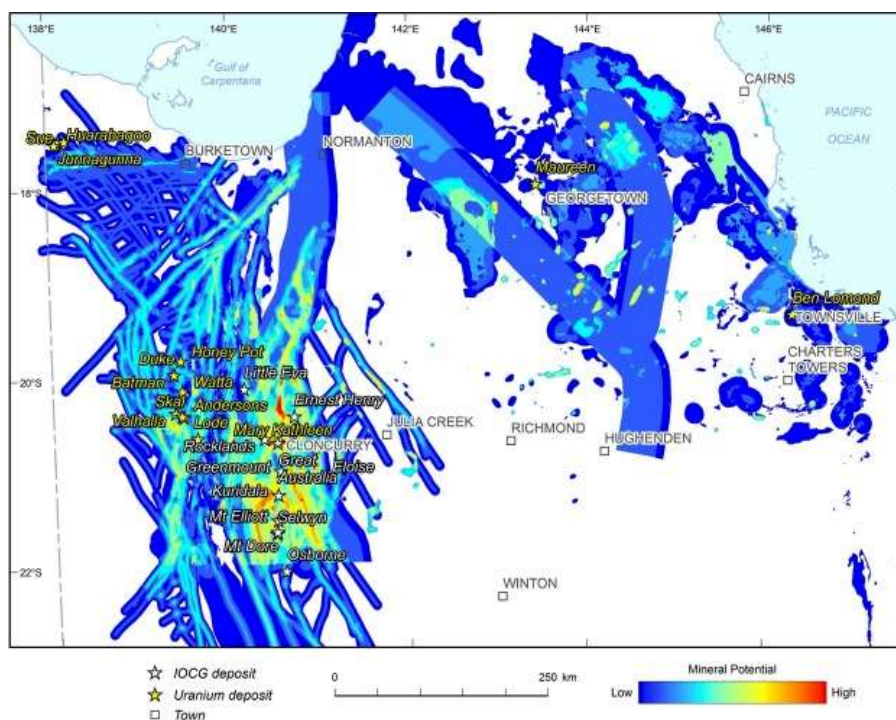


Рис. 66. Уран-IOCG потенциал северного Квинсленда.

### *IOCG-рудный потенциал региона Gawler-Curnamona*

Потенциал урансодержащих IOCG месторождений был оценен для большого региона Южной Австралии, охватывающего восточную часть кратона Gawler и западную часть провинции Curnamona, с использованием четырехкомпонентной схемы рудных систем и метода весовых коэффициентов, описанного выше (рис. 67).

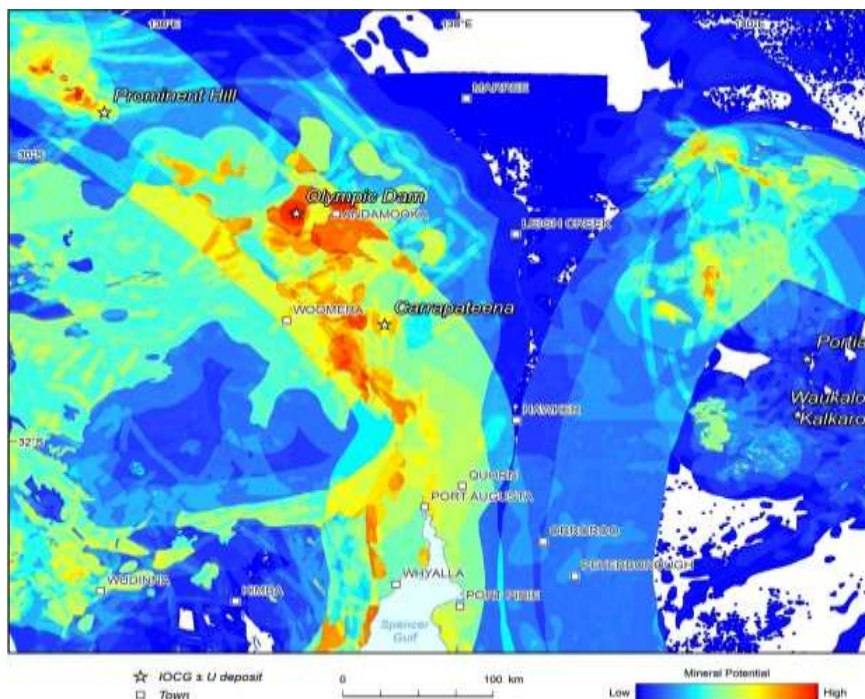


Рис. 67. Уран-IOCG потенциал восточной части кратона Gawler и западной части провинции Curnamona.

Известные месторождения не были включены в анализ, и все же результаты показывают хорошую пространственную корреляцию между местоположениями крупных IOCG месторождений (Olympic Dam, Prominent Hill) и смоделированными зонами высокой или умеренной перспективности.

Однако месторождение Carrapateena, а также несколько небольших Cu-Au месторождений с вероятным сходством с типом IOCG в провинции Curnamona (Kalkaroo, Portia, Waukaloo) плохо коррелируют с результатами моделирования перспективности. В случаях Carrapateena несоответствие может быть связано с: (а) отсутствием отчетливой магнитной аномалии на месторождении, (б) редкой сетью (4×4 км) для инверсионной модели гравитационных и магнитных данных и (с) сглаженным характером гравитационной аномалии, выявленной при региональной съемке по сети 4×4 км, связанным с большой глубиной залегания источника.

Соответственно, если в моделировании перспективности использовать гравитационные данные с более высоким пространственным разрешением и трехмерные модели инверсии с соответствующим размером вокселя, вполне вероятно, что месторождение Carrapateena была бы выявлено по результатам оценки перспективности. Так или иначе, месторождение расположено в широком коридоре от умеренной до высокой степени перспективности, что отчасти определяется глобальной структурой земной коры и пространственно совпадающими в этом коридоре магматическими породами кислого и основного составов.

Что касается небольших Cu-Au месторождений в западной части рудной провинции Curnamona (Portia, Kalkaroo), то они расположены на модели в пределах области с низкой степенью перспективности. Причины такого несоответствия неясны, хотя в некоторых пластовых Cu-Au±Mo месторождениях, содержащих метаосадочные отложения, отсутствуют заметные количества оксидов железа в более богатых рудных зонах, которые сформировались раньше, чем IOCG месторождения в кратоне Gawler (~ 1630-1605 млн лет). Интересно, что проявляются две отдельные области умеренной-высокой степени перспективности к северо-западу от известных Cu-Au месторождений, одна - вдоль северо-западной части хребта Benagerie Ridge, и вторая область, охватывающая внутренние части районов Mt Painter и Mt Babbage и области к востоку от них, где протерозойский фундамент скрыт под более молодыми осадочными бассейнами. Предполагается, что эти области заслуживают последующего изучения как потенциально новая и в значительной степени скрытая IOCG-провинция.

***IOCG-рудный потенциал южной части штата Северная Территория.***

На рис. 68 показаны результаты картирования урансодержащего IOCG-потенциала крупного региона южной части штата Северная Территория.

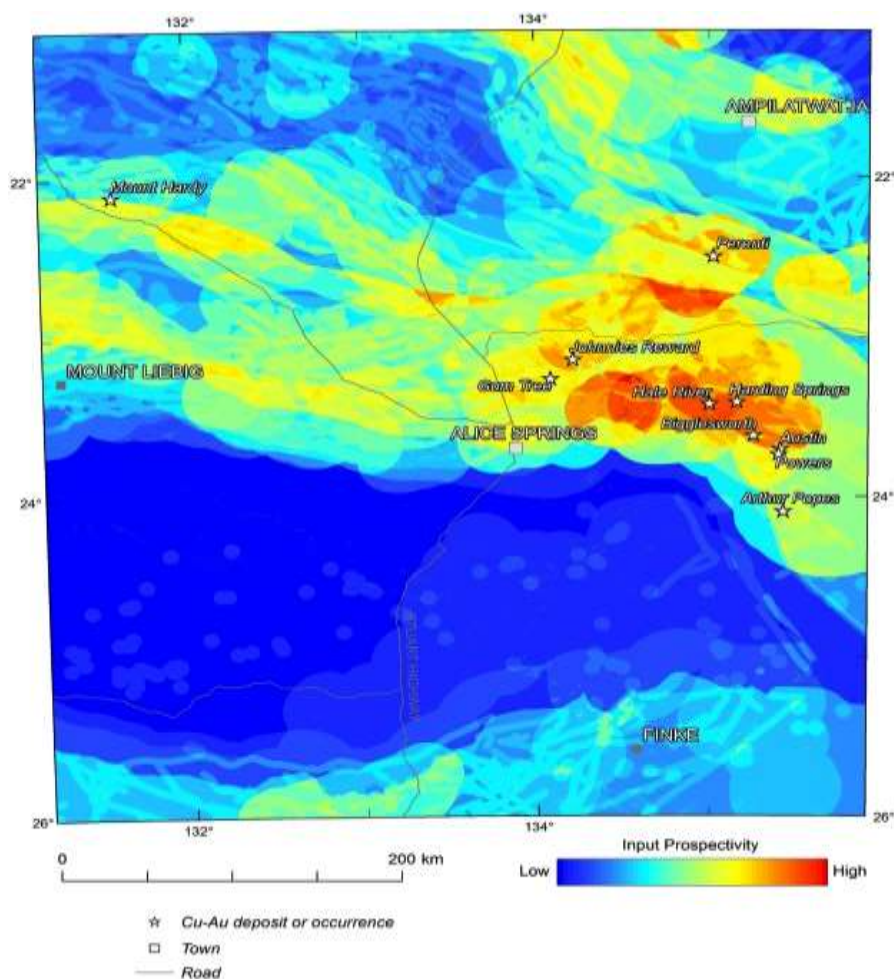


Рис. 68. Уран-IOCG потенциал в южной части региона Северная Территория.

Особо следует отметить районы с высокой степенью прогнозной перспективности в центрально-восточной части региона. Наложение известных медно-золотых месторождений и рудопроявлений показывает хорошую пространственную корреляцию. Хотя месторождения в этом регионе еще недостаточно изучены, появляются свидетельства нескольких стадий минерализации цветных металлов в районе месторождения Jervois, расположенного непосредственно к востоку от изучаемого района, включая поздние стадии структурно-контролируемой массивной магнетит-халькопиритовой брекчиевой минерализации. Этот результат рассматривается как положительная проверка общего подхода и наборов данных, используемых при моделировании рудного потенциала.

#### ***IOCG-рудный потенциал южной части провинции Aileron.***

Результаты оценки IOCG-рудного потенциала в южной части провинции Aileron в регионе Arunta, штат Северная Территория, показаны на рис. 69А.



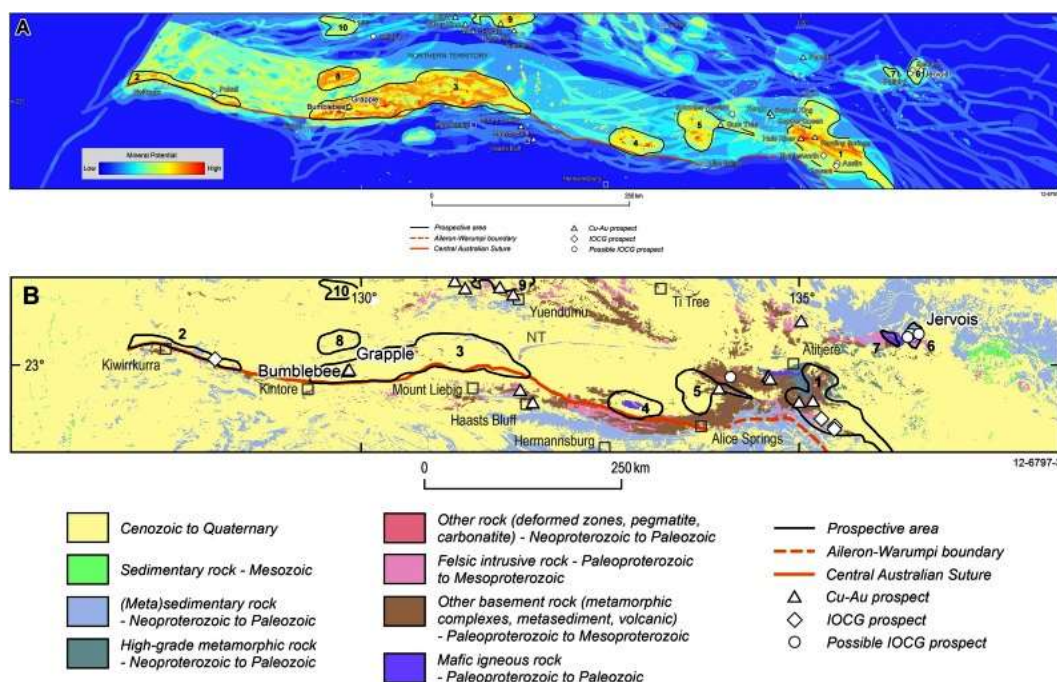


Рис. 69. А–IOCG-потенциал южной части региона Arunta, Северная Территория, с контурами перспективных площадей (пронумерованы). В–Поверхностная геология южной части региона Arunta.

Местоположения областей, перспективных на типы, аналогичные IOCG, а также на другие типы Cu-Au месторождений и возможные аномалии, перспективные на тип IOCG, такие как месторождение Jervois, накладываются на результаты, демонстрируя хорошее пространственное соответствие с модельными областями высокой и средней перспективности. Хотя перспективные площади Grapple и Bumblebee, по-видимому, не относятся к типу IOCG, они могут служить примерами, когда при картировании рудного потенциала были выявлены площади, перспективные на Cu-Au порфировый тип оруденения, которое контролируется геологическими факторами, аналогичными факторам, контролирующим тип IOCG.

### ***IOCG-рудный номенциал региона Tennant Creek – Mt Isa.***

Проезучные карты для четырех отдельных компонентов рудной системы показаны на рис. 70, а окончательная карта IOCG-рудного потенциала представлена на рис. 71. Это исследование является первым, в котором в моделирование рудного потенциала были включены альтернативные генетические модели - рудных флюидов – как вмещающих пород, так и гидротермально- магматических ( $S_1$  и  $S_2$  на рис. 65).

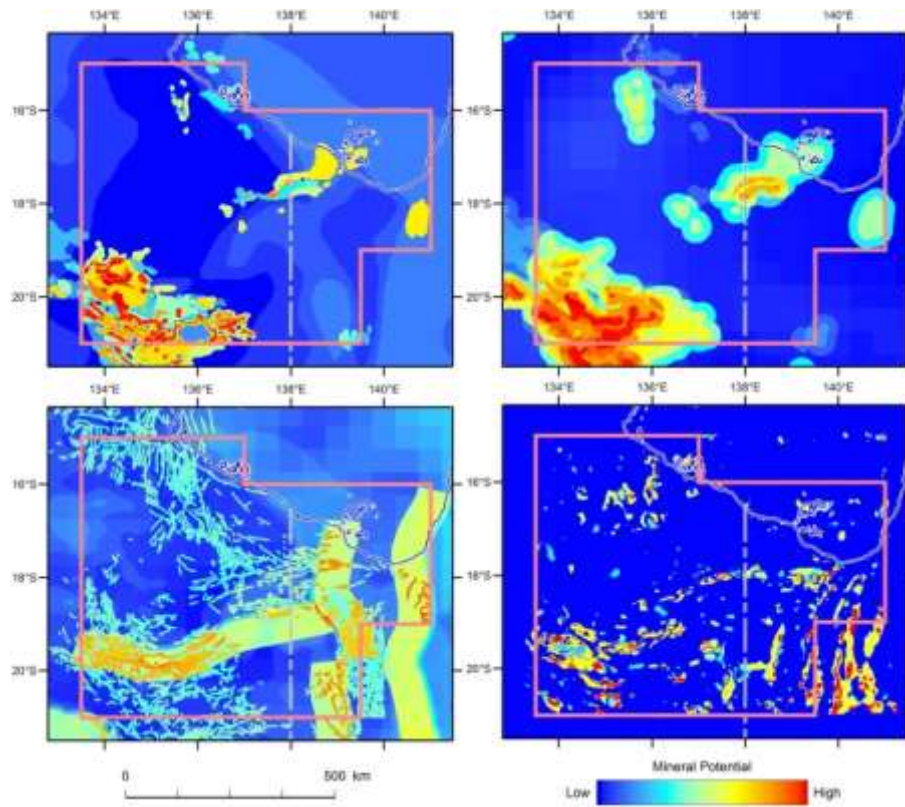


Рис. 70. Промежуточные карты для каждого из четырех компонентов рудной системы района Tennant Creek–Mt Isa (розовый контур): *вверху слева: источники металлов и жидкостей; вверху справа: движущие силы/источники энергии; внизу слева: структуратраектории; справа внизу: градиенты рудоотложения*

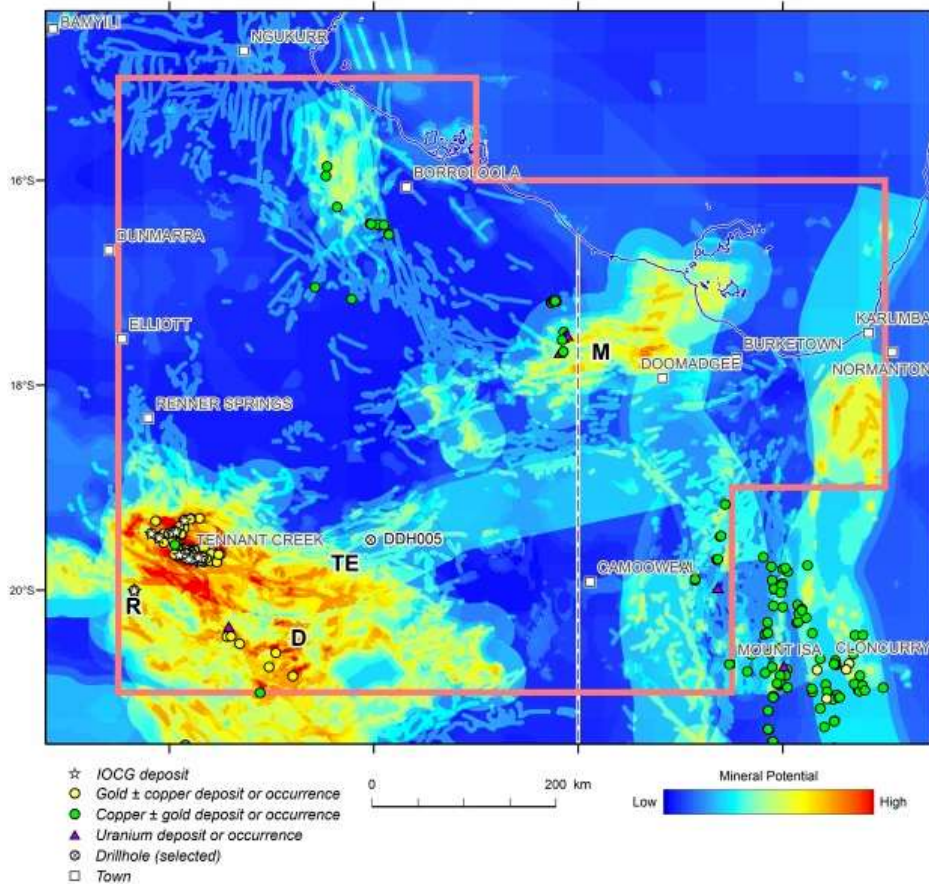


Рис. 71. Потенциал IOCG месторождений района (показаны местоположения значимых месторождений и рудопроявлений).

Выделены несколько перспективных площадей, в том часть провинции Davenport к югу от Tennant Creek, области с маломощным чехлом к востоку, область Rover к юго-западу и регион Murphy Inlier. Подтверждая эти результаты, предварительные петрологические исследования в пробуренной ранее скважине к востоку от Tennant Creek указывают на присутствие гидротермальных изменений, характерных для месторождений типа IOCG, в том числе магнетитовые, калиевые и более поздние гематит-серицит-хлоритовые изменения, связанные с умеренно высокой степенью перспективности на тип IOCG.

Для сравнения и изучения влияния пространственно сгруппированных и более равномерно распределенных входных данных на рис. 72 показаны результаты после исключения точечных данных (по обнажениям из геологической базы данных). Объем этих входных данных представляет собой все геофизические характеристики, включая сейсмическую томографию (коры и мантии), магнитотеллурические данные и результаты гравитационных и магнитных инверсий.

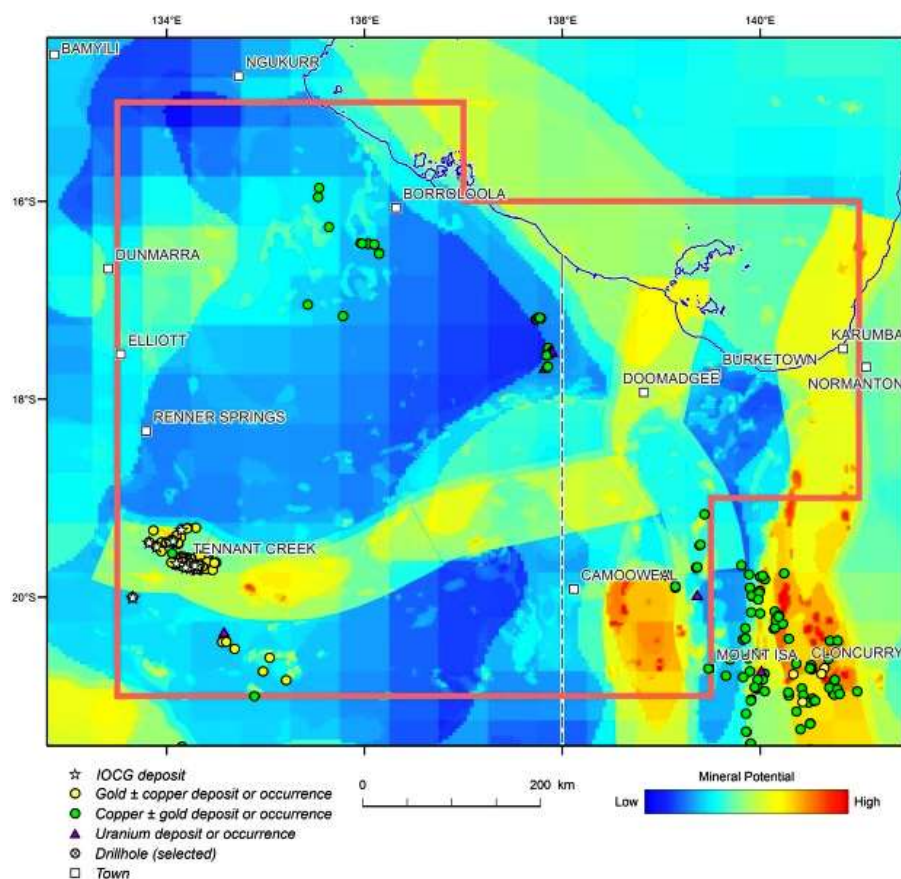


Рис. 72. Потенциал IOCG-месторождений в области Tennant Creek–Mt Isa исключая точечные данные.

### Проверка результатов, оценка неопределенности и будущие направления.

Чтобы проверить достоверность картирования рудного потенциала, изучили корреляцию между местоположениями известных месторождений IOCG и

смоделированной перспективностью для района исследования Tennant Creek-Mt Isa (рис. 73).

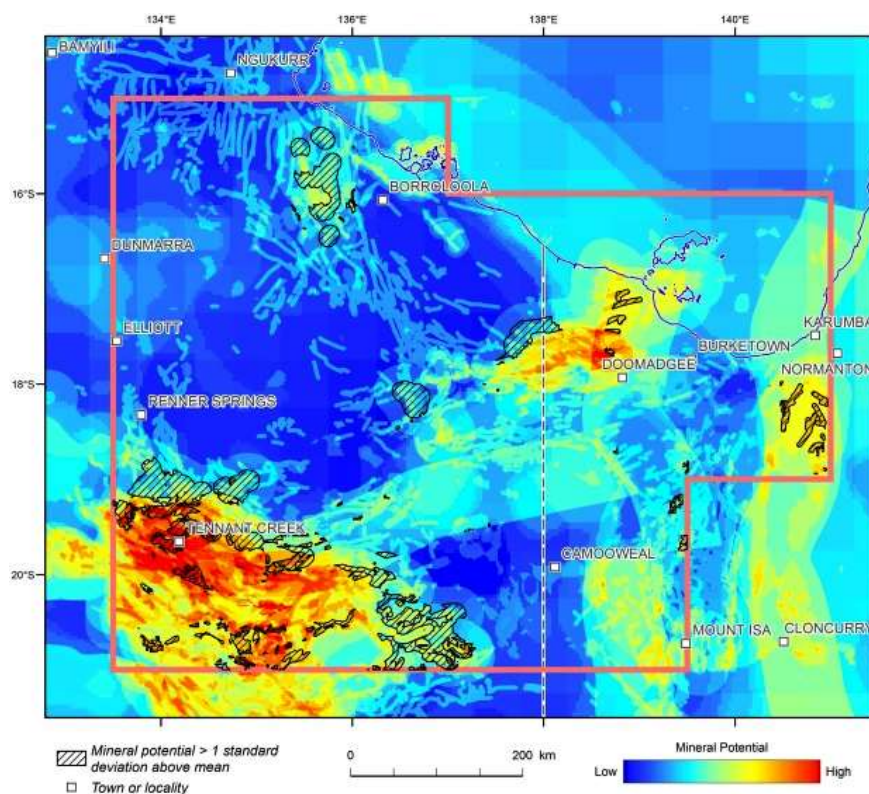


Рис. 73. Результаты моделирования исследуемой области Tennant Creek–Mt Isa методом Монте-Карло ( $n = 500$ ) с рандомизированными весовыми коэффициентами для наборов исходных данных. *Заштрихованные области – рудный потенциал выше, чем стандартное отклонение от среднего значения для каждой ячейки в пределах изучаемой области.*

Несмотря на то, что количество месторождений статистически невелико, анализ показывает, что 15 из 16 месторождений IOCG находятся в пределах областей с самой высокой степенью перспективности, занимающих всего 4,2% от общей площади, что уменьшает изучаемую площадь на 95,8%. Этот результат дает надежную основу для предположения, что другие области высокой степенью перспективности заслуживают последующих исследований и постановки ГРП на тип IOCG.

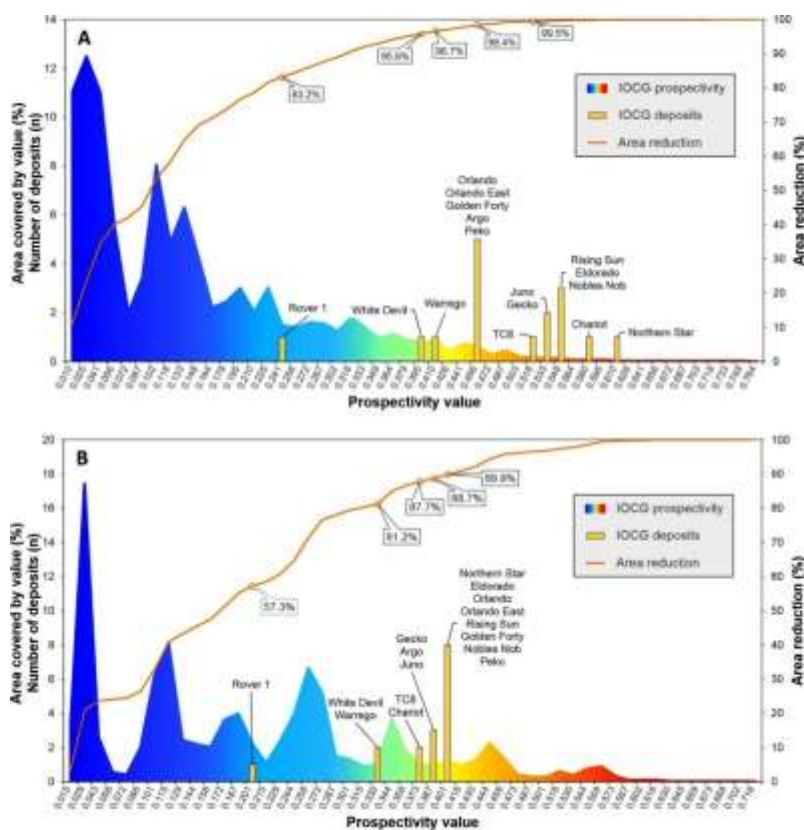


Рис. 74. Статистический анализ пространственной корреляции между моделью, представленной на рис. 71 (рис. 74А) и рис. 72 (рис. 74В), и локализацией 16-ти месторождений в области Tennant Creek-Mt Isa.

Как на рис. 74А, так и 74В значения перспективности по оси x представляют верхние значения ячеек, а оранжевые кривые - кумулятивные области цветных гистограмм значений перспективности с метками, показывающими процент уменьшения площади для выбранных месторождений

Для сравнения, на рис. 74В показана статистика результатов перспективности, представленных на рис. 72. Хотя корреляция слабее, чем на рис. 74А, с уменьшением площади ~ 80% для 15 из 16 месторождений IOCG, следует отметить, что для достижения этого результата потребовалось только 7 наборов входных данных. Кроме того, все эти слои - геофизические данные, которые охватывают всю область исследования, хотя и с разными уровнями пространственного разрешения (что отражено в разном весе «достоверности», таблица 5). Одним из следствий этого является то, что очень значительное уменьшение площади (>80%) достижимо при использовании только геофизических данных, таких как гравиразведка, магниторазведка, пассивная сейсморазведка, магнитотеллурические и данные сейсморазведки методом отражённых волн. Очевидно, что результаты картирования перспективности значительно улучшаются, когда используется полный набор входных наборов данных, как показано в таблице 5 и на рисунке 71.

Таким образом, результаты показывают, что подход, основанный на знаниях и большом объеме опытных данных, с использованием четырехкомпонентной структуры рудных систем, может применяться для выявления и картирования рудного потенциала.

Этот метод способен прогнозировать рудный потенциал даже в регионах, где предполагаемый фундамент скрыт под чехлом, при условии, что основные входные наборы данных доступны с соответствующим пространственным разрешением для каждого из четырех компонентов рудной системы.

Ограничения, присущие методу суммированы в таблице 6 вместе с методами, которые могли бы быть использованы для смягчения эти ограничений.

Табл. 6. Ограничения применимости метода, основанного на знаниях, для картирования рудного потенциала и методы снятия ограничений

Ограничения метода	Используемые методы смягчения ограничений	Планируемые методы смягчения
1. Неравномерное пространственное распределение исходных данных, (точечные данные, и/или области, где нет данных) приводит к завышению перспективности в областях с большим количеством данных	Точечные данные не используются, если они не охватывают всю исследуемую область и не привязаны к сетке (гравитационные данные); области без данных могут быть отсеяны; точечные данные усредняются для более крупных объектов, таких как пачки горных пород или геологические события; наборы данных, зависящие от обнажений, не используются	Областям без данных может быть присваивено нейтральное значение в исходных наборах; плотность данных можно повысить за счет привлечения большего количества данных
2. Неопределенности геологической модели рудных систем	Используются две альтернативные генетические модели IOCG месторождений одновременно (Tennant Creek-Mt Isa); критериям с высокой неопределенностью присваиваются низкие веса	Совершенствовать модели рудных систем; проводить новые изыскания в интересующих регионах
3. Субъективность в присвоении весовых коэффициентов наборам исходных данных	Чувствительность результатов картирования перспективности к весовым коэффициентам, проверена путем назначения рандомизированных весовых коэффициентов в большом количестве моделируемых случаев (метод Монте-Карло), с получением показателей дисперсии	Использование метода Монте-Карло для количественной оценки пространственных неопределенностей

Проблема 3, субъективное присвоение весовых значений входным наборам данных (таблица 5), является одним из аспектов более широкой проблемы субъективности в моделировании перспективности, основанной на *знаниях*. Влияние различных весовых коэффициентов на результаты оценки перспективности для района Tennant Creek–Mt Isa исследовали применяя анализ вероятностным методом Монте-Карло. Тест включал 500 итераций с весами, рандомизированными между [0] и [1] для каждого набора входных данных перед объединением результатов (путем сложения) четырех компонентов рудной системы. Были рассчитаны статистические данные для каждой ячейки (85x85м) выходных данных; пример выходных данных показан на рис. 73, на котором выделены (заштрихованы) области со значениями рудного потенциала, превышающими стандартное отклонение (sd) от среднего значения для каждой ячейки. Сравнение этих областей с исходным результатом с использованием субъективно назначенных (детерминированных)

весовых коэффициентов, перечисленных в таблице 5 (рис. 71), показывает, что заштрихованные области в большинстве случаев являются «максимумами в пределах максимумов». Этот результат интерпретируется как указание на то, что в исследуемом регионе есть области, где рудный потенциал является аномально высоким по сравнению с окружающими областями, независимо от присвоенных весовых значений. В то время как большинство из этих областей были выявлены с использованием первоначального набора субъективно назначенных весов, (табл. 5), есть несколько дополнительных заштрихованных областей, выделенных при моделировании по методу Монте-Карло вокруг полей наиболее перспективных районов (~50–100 км) к северу от Tennant Creek. В более общем смысле, результаты моделирования методом Монте-Карло означают, что различия значений входных данных по всей исследуемой области (наличие или отсутствие благоприятных геологических пород в определенных областях или максимумы гравитации/или электропроводности) оказывают большее влияние на результаты картирования рудного потенциала, чем весовые коэффициенты.

Необходимы дальнейшие исследования для более всестороннего тестирования и понимания неопределенностей, возникающих при назначении весов. Другое возможное направление развития метода включает в себя комбинацию машинного обучения (включая подходы, основанные на опытных *данных*) с описанным здесь подходом, основанным на *знаниях*. Интеграция этих методов может помочь смягчить недостатки каждого подхода и повысить их сильные стороны.

С учетом преимуществ и ограничений, изложенных выше, рекомендуется, чтобы описанный здесь подход, основанный на *знаниях*, наиболее подходящим образом использовался для выбора площадей проведения ГРП и изучения перспективности в региональном масштабе. Он не предназначен для разведочных работ в масштабе месторождения. Результаты применения метода будут улучшаться при вводе новых входных данных с более высоким разрешением.

В целом, Geoscience Australia разработала и применила научно-обоснованный метод минерагенического картирования, основанный на концепции четырехкомпонентных рудных систем. Этот метод основан на относительно простом подходе наложения индекса в ГИС-среде. Показано, как модель рудной системы (для месторождений типа IOCG) может быть преобразована в картируемые параметры, и как затем составляются карты рудного потенциала путем совмещения различных наборов исходных данных.

При изучении пяти регионов Австралии было проведено минерагеническое картирование на тип IOCG, а затем результаты были сопоставлены с распределением известных месторождений, данные о которых не использовались в исследовании. Были

выявлены области, в которых находятся почти все известные крупные месторождения; некоторые исключения объясняются отсутствием соответствующих исходных данных с высоким разрешением.

Двумя сильными сторонами метода, основанного на знаниях и большом объеме опытных данных, являются способность (а) прогнозировать области с высоким рудным потенциалом, где перспективные породы скрыты под более молодыми бассейнами и/или реголитами, и (б) картирование перспективности разных вариантов искомого типа месторождений. Первое преимущество достижимо благодаря интеграции разнообразных геофизических, геологических и геохимических наборов исходных данных, многие из которых имеют региональный или континентальный масштаб и позволяют визуализировать части рудообразующих систем, скрытых под чехлом пород. Впервые при картировании перспективности были использованы магнитотеллурические данные вместе с новыми методами обработки данных сейсморазведки и потенциального поля (гравиразведки, магниторазведки). Второе преимущество, состоящее в способности метода выявлять вариации и гибридные типы искоемых месторождений, является результатом использования концептуальной основы рудных систем, которая фокусируется на геологических процессах, необходимых для формирования крупных рудных месторождений. Большие скопления рудных металлов требуют совпадения во времени и пространстве: (1) доступных источников рудных металлов, гидротермальных флюидов и лигандов, (2) источников энергии для гидротермальных систем, (3) активной структуры траекторий потока флюидов и (4) физико-химических градиентов, вдоль которых происходит рудотложение. Подход, основанный на *знаниях* отображает геологические и геофизические критерии («прокси») для каждого из этих четырех компонентов рудной системы для искомого типа месторождения, в интересующей области, для конкретного временного окна. Поскольку одни и те же факторы являются общими для целого ряда типов месторождений, картирование рудного потенциала, основанное на *знаниях*, будет определять перспективность не только для выбранного типа месторождения, но также, вероятно, для его вариаций и гибридных типов, образование которых также контролируется теми же или аналогичными геологическими процессами. Напротив, методы картирования перспективности, которые основаны на известных месторождениях в качестве обучающих данных для изучения окружающих областей, могут быть менее успешными при идентификации вариантов или гибридов известного типа месторождения. Несмотря на это, планируется использовать в будущем комбинации метода, основанного на *знаниях* и большого объема опытных данных, с методами машинного обучения на

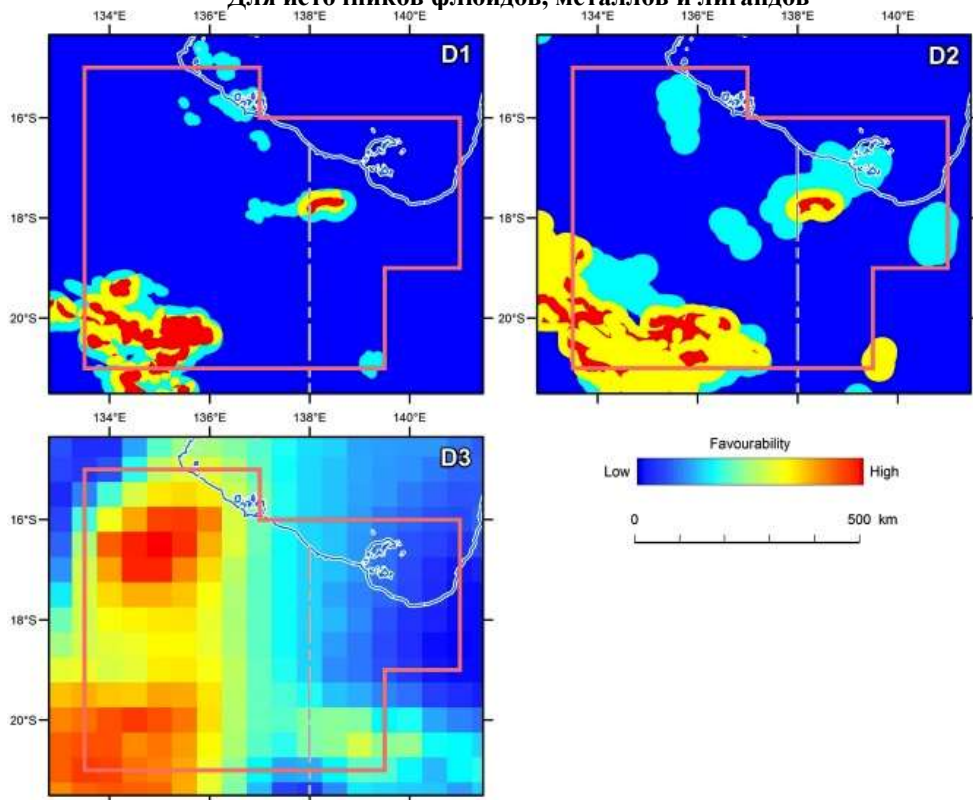


основе эмпирических данных, с обучением на известных месторождениях для устранения недостатков каждого из этих методов и повышения их преимуществ.

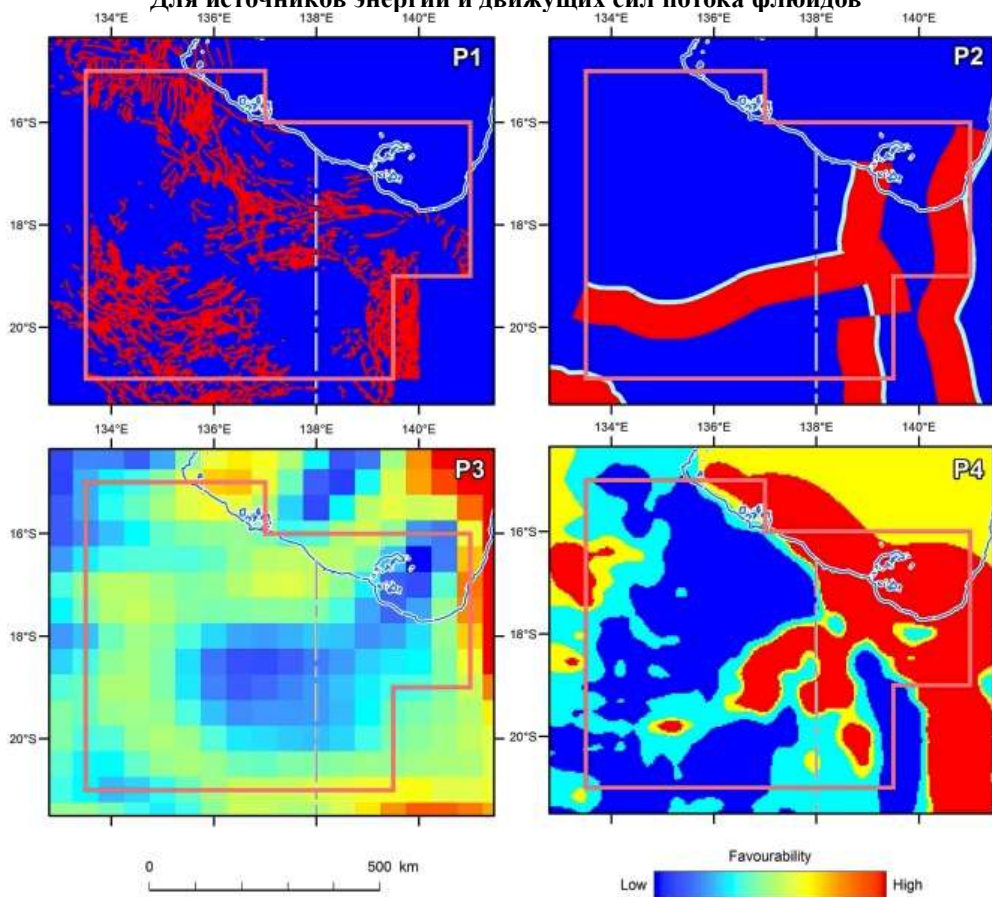
Метод картирования рудного потенциала на основе знаний о рудных системах и большого количества опытных данных, рекомендуется для использования госорганами и компаниями, занимающимися разведкой полезных ископаемых, в качестве инструмента поддержки принятия решений для выявления рудных объектов в ранее неизученных регионах, включая террейны, скрытые под более молодым чехлом. Этот подход наиболее целесообразно применять в региональных масштабах.

## ИЗОБРАЖЕНИЯ НАБОРОВ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ для района Tennant Creek

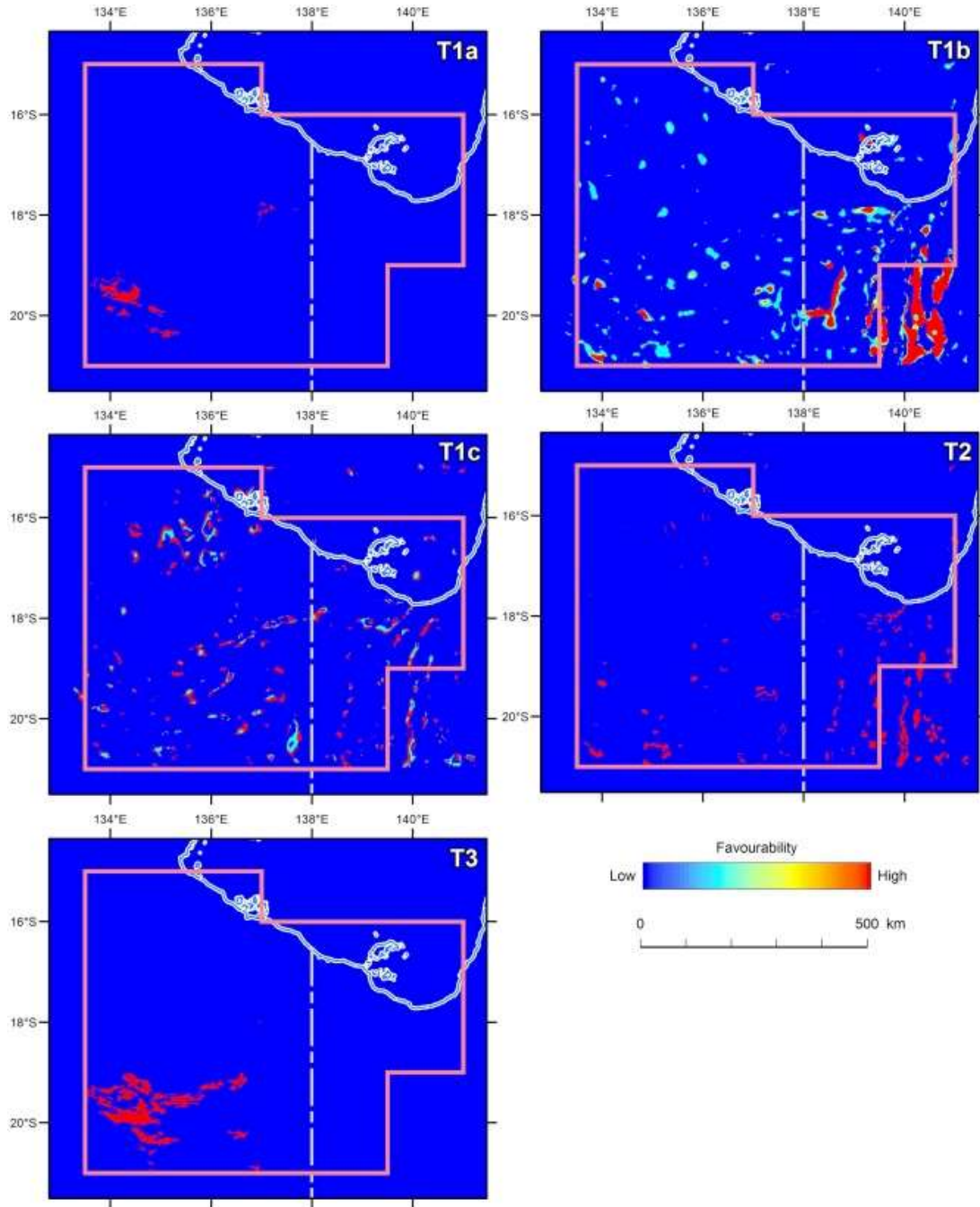
## Для источников флюидов, металлов и лигандов



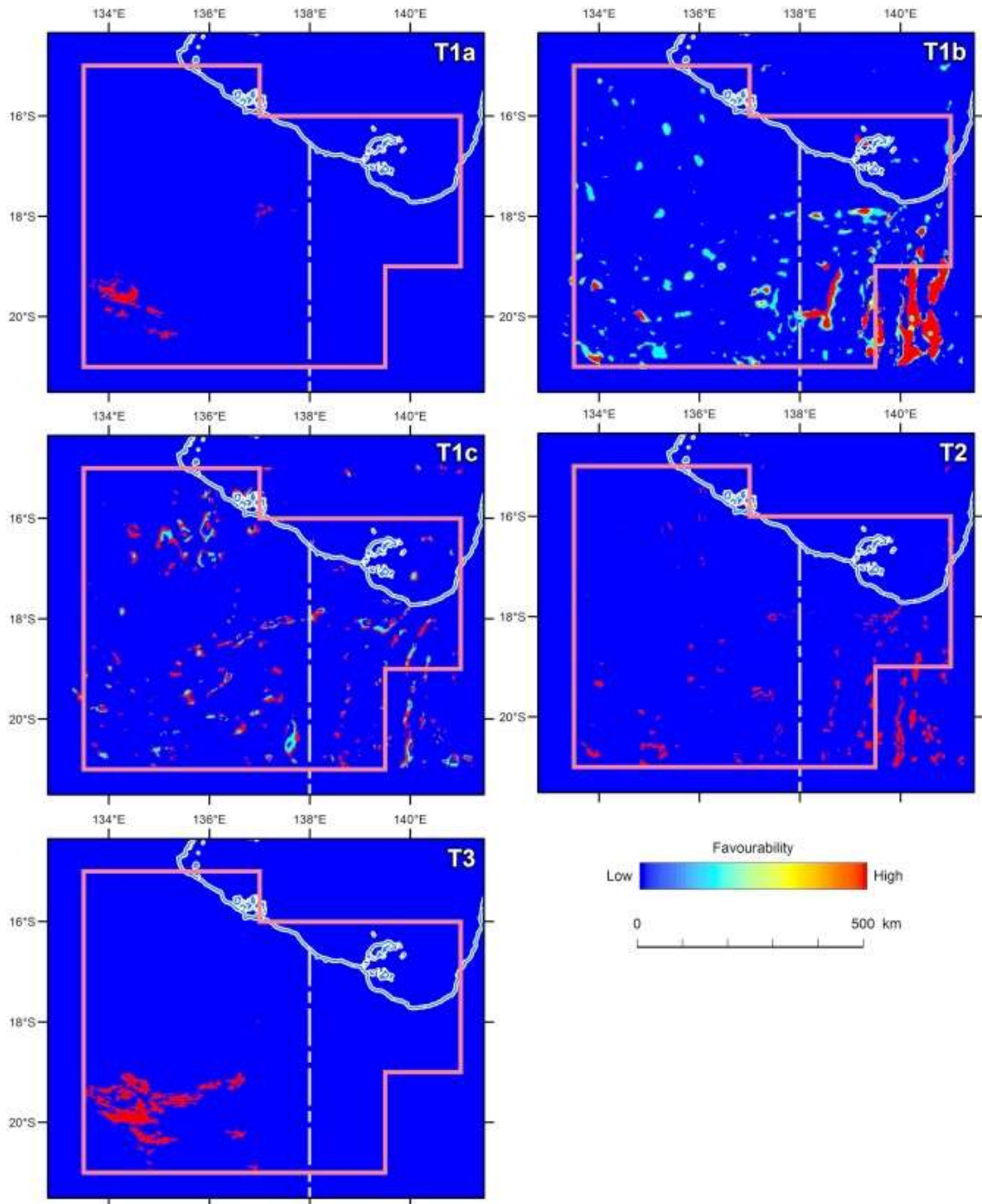
## Для источников энергии и движущих сил потока флюидов



## Для траекторий и структуры



## Для градиентов рудоотложения



## 7. ПЕРСПЕКТИВЫ ПОИСКОВ ИОСГ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (СВ России)

Фундаментальной проблемой геологии рудных месторождений является прогнозирование и поиски. Одни из них - ИОСГ месторождения, потенциал открытия которых на СВ России пока неясен.

Поскольку ИОСГ оруденение характеризуется неоднородностью руды и металлов, применение новых поисковых методов, таких как многомерное геометрическое распределение с использованием ГИС должно быть многообещающим. Классическая геометрия недр, как метод математического моделирования пространственного распределения отдельных элементов, в случае их сложных взаимоотношений может привести к ситуации, когда каждый элемент имеет свою геометрию, т.е. очертания аномалий различных показателей не совпадают. Это снижает надежность любой оценки из-за ошибок в определении типа минерализации и ее масштабов. Поэтому возникла необходимость в разработке многомерной модели геометрического распределения минерализации, которая очерчивает однородные участки объекта одновременно по всем элементам, что исключает неоднозначность при построении их границ. Кроме того, такой подход обеспечивает наилучшую оценку средних значений параметров минерализованных тел (содержания элементов, мощности и т. д.), что обеспечивается новым решением статистической задачи многомерного распределения.

### **Предпосылки ИОСГ минерализации в Восточной Якутии [18].**

Обзор образцов привел к идентификации типов руд, которые могли быть отнесены к ИОСГ минерализации, но которые ранее считались продуктом окисления сульфидных руд:

1. Зона Позолота в Нуэктаминском районе включает штокообразное тело молочно-друзового кварца с гематитовым цементом и содержанием золота от 1,2 до 19,8 г/т ( [рис. 75А](#) ).

2. Поле эруптивных брекчий Эндыбальского района включает крупные тела брекчий с гетитом в качестве цемента, сходные с рудными ИОСГ брекчиями ( [рис. 75В](#) ).

3. Кискуэльский диорит-гранодиоритовый интрузив включает различные типы ИОСГ минерализации - брекчированный гранодиорит с железоксидным цементом ( [рис. 75С](#) ) и брекчированные роговики с оксидом железа и сульфидным цементом ( [рис. 75D](#) ).

4. Реп-Юруинское проявление оксидов железа, выявленных на снимках Landsat TM, которое было подтверждено как ИОСГ минерализация. Это рудопроявление связано с брекчированными и метасоматизированными породами ( [рис. 75А, Б](#) ). Брекчии включают мощные линзы кварц-хлоритовых метасоматических изменений с вкрапленной сульфидной минерализацией меди. Цвет брекчии зависит от насыщенности оксидов

железа и изменяется в зоне гипергенеза от темно-коричневого до различных оттенков коричневого и желто-коричневого. Брекчии обычно гетеролитические и сложены округлыми обломками или мелкозернистым массивным материалом, что может интерпретироваться, как результат растворения в агрессивных гидротермальных растворах. В составе обломков присутствуют граниты ранней фазы и ороговикованные породы зоны экзоконтакта. Поле брекчий зоны ороговикования Реп-Юрюинской группы плутонов было опробовано и проанализировано на рентгенофлуоресцентном спектрометре Niton XL3t 500, средние содержания элементов в брекчиях составляют (в %): Mn – 6.07, Co – 2.34, Ni – 0.29, U – 0.013, Th – 0.053, Mo – 0.009, Cu – 0.17, Hg – 0.21, As – 0.32, Pb – 0.06, Zn – 0.15, Sn – 0.032, W – 0.24, Au – 0.0214, Ag – следы. По данным химического количественного анализа содержание Fe варьирует от 14.25 до 56.43% (среднее – 26.03%). Площадь брекчий составляет ~5 км<sup>2</sup>, а плотность колеблется от 2,41 до 3,23 (в среднем = 2,76 т/м<sup>3</sup>). Ресурсный потенциал может составлять около 712 Мт при глубине залегания 50 м. [В таблице 7](#) Реп-Юрюинское проявление сравнивается с мировыми ЮСГ месторождениями.

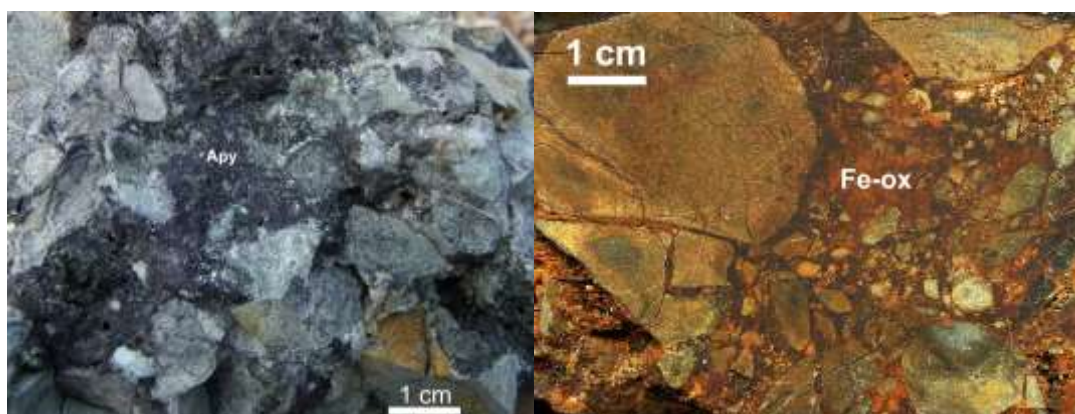


Рис. 75 Брекчированные ороговикованные породы с арсенипиритовым (А) и Fe-оксидным цементом (Б)

Табл. 7 Сравнение Реп-Юрюинского проявления с мировыми ЮСГ месторождениями

Deposit	Country	Resource (Mt)	Cu (%)	Au (g/t)
Aitic	Sweden	226	0.37	0.20
Manto Verde	Chile	560	0.52	0.11
Candelaria	Chile	470	0.95	0.22
Cristallino	Brazil	500	1.00	0.30
Rep-Yuruinskiy	Russia (Yakutia)	716	0.53	1.17
Sossego	Brazil	355	1.10	0.28
Salobo	Brazil	789	0.96	0.52
Ernest Henry	Australia	167	1.10	0.50
Olympic Dam	Australia	3810	1.10	0.50
Raul Condestable	Peru	32	1.70	0.30
Igarape Bahia	Brazil	170	1.50	0.80

5. Участок оруденения, связанный с Верхне-Чубухулахским интрузивом, опробован и проанализирован атомно-абсорбционной спектрометрией (AAS) на Au и атомно-эмиссионной спектрометрией (AES) на Cu. Многомерное геометрическое распределение оруденения Верхне-Чубухулахского интрузива было закартировано по 19 элементам с помощью программного пакета AGATA (рис. 76). Среднее содержание элементов по основным типам минерализации показано в [таблице 8](#).

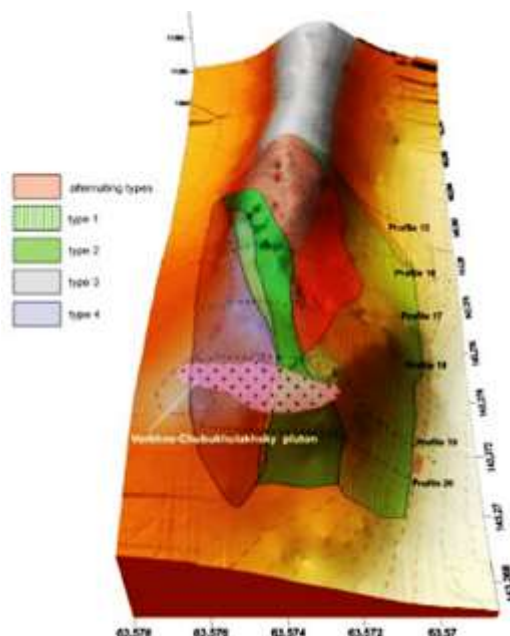


Рис. 76 Многомерное геометрическое распределение эндо- и экзоконтактных зон Верхне-Чубухулахского интрузива.

Табл. 8 Среднее содержание элементов по основным типам минерализации.

Element	Type 1	Type 2	Type 4
Fe	101293	32735	16108
Co	24889	7297	5583
Cr	8444	4002	3188
V	5144	2599	1917
Pt	5720	4455	932
W	3744	2652	696
Hg	3276	2442	602
Cu	2524	1957	574
Zn	2269	1603	457
Sc	632	642	1075
Au	334	92	148
U	157	36	199
Zr	144	129	140
Sr	86	39	86
As	4182	4809	759
Se	640	1.067	295
Th	535	1.039	180
Pb	694	804	231
Ag	13	15	0

Ниже приводится краткое описание типов минерализации:

Тип 1 соответствует высшим классам, связанным с брекчией оксида Fe в зоне экзоконтакта. Кроме того, в этой зоне присутствуют жилы поздней стадии, сложенные арсенопиритом, вольфрамитом, халькопиритом и сфалеритом.

Тип 2 расположен в толще брекчированных роговиков и характеризуется изначально низкой проницаемостью для гидротермальных растворов, что приводит к низким концентрациям Au и U

Тип 3 связан с самой внешней зоной экзоконтакта интрузивного массива, переходящей в неизмененный песчаник.

Тип 4 соответствует внешней брекчированной зоне экзоконтакта, где гидроксид железа развит слабо и жилы отсутствуют. Для этого типа характерно самое высокое содержание U.

Интерпретация снимков Landsat выявила большое количество участков с отчетливыми цветами, указывающими на оксиды Fe - от темно-оранжевого до красновато-коричневого.

Для оценки потенциала территории на IOCG оруденение был создан ГИС-проект, в который входят:

Базовая геология с расположением плутонов и их упрощенной геометрией;

База геоданных опробования плутонов (более 4 000 анализов);

Онлайн-сервис ArcGIS с 15-метровыми изображениями eSAT;

Аэромагнитные данные с межпрофильным интервалом 1 км.

На первом этапе исследований выделяются перспективные гранитоиды типа A и I с Fe, Cu, Au и U-минерализацией. На втором этапе исследуются участки с повышенными концентрациями оксидов железа на предмет их возможной связи с Fe, Cu, Au и U IOCG оруденением.

#### *Уран*

Как показано на примере австралийских месторождений, основной элементный состав горных пород играет важную роль в поведении урана. Самые высокие концентрации урана соответствуют: диаграмма ASI - U: индекс ASI от 0,9 до 1,2; диаграмма  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$  - U: индекс агрегации от 0,6 до 1,0.

#### *Медь и золото*

Для оценки потенциала Au-Cu и Cu-Mo минерализации использовались данные по медно-порфировым месторождениям Монголии. Отношение  $\text{AK}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  в диапазоне от 0,3 до 0,7 было установлено для магматических систем Cu-Mo, тогда как для систем Au-Cu диапазон увеличивается до 0,7-1,3. Из базы геоданных образцы с Au-Cu минерализацией были отобраны на основе отношения  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  от 0,7 до 1,3. Чтобы ранжировать перспективы Au-Cu минерализации, был использован фильтр, который отбирает интрузивные объекты, принадлежащие к известково-щелочной и шощонитовой сериям с высоким содержанием калия. Алгоритм фильтра основан на формулах для



кривых, которые описывают ряды магматических пород на диаграмме  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ . Общая форма уравнения -  $\text{K}_2\text{O} = k W \text{SiO}_2 - b$ , а запросы принимают форма, например:

*Для пород толеитовой серии:*  $\text{K}_2\text{O} < (0,033462 W [\text{SiO}_2] - 1,5)$

*Для пород известково-щелочного ряда:*  $\text{K}_2\text{O}$  между  $(0,033462 W [\text{SiO}_2] - 1,5)$  и  $(0,066507 \times [\text{SiO}_2] - 2,5)$

*Для пород высококалиевого известково-щелочного ряда:*  $\text{K}_2\text{O}$  между  $(0,066507 W [\text{SiO}_2] - 2,5)$  и  $(0,169054 \times [\text{SiO}_2] - 7,12)$

*Для пород шошонитового ряда:*  $\text{K}_2\text{O} > (0,169054 \times [\text{SiO}_2] - 7,12)$ .

В дополнение к исследованию с использованием плутонов известково-щелочного ряда с высоким содержанием калия, были применены дополнительные условия: размер территории  $< 5 \text{ км}^2$ ; соотношение  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  0,3-0,7 (для систем Cu-Mo) и 0,7-1,3 (для систем Au-Cu).

Анализ интрузивных массивов с использованием трех алгоритмов: ASI - U;  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - U$ ; и  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  для систем минерализации U и Au-Cu определил наиболее перспективную их группу: Бургалийский, Верхне-Бургалийский, Лево-Жолакагский, Верхне-Тирехтяхский, Восточно-Полоусный, Горное Озеро, Друза, Ильниманский, Лево-Аласейский, Маган-Тасский, Право-Туостахский, Тарбагманский, Таканалкоцанский, Таканалкоцанский. С помощью Arc Gis Online полученные с помощью i-куба 15-метровые изображения eSAT показали наличие повышенных концентраций оксидов железа на периферии Бургалийского, Верхне-Бургалийского, Лево-Жолакагского, Верхне-Тирехтяхского, Друзы, Право-Туостахского и Такалканского плутонов.

Крупные магматические системы с потенциалом IOCG могут иметь три типа оксидной минерализации Fe: непосредственно на контактах с интрузивными породами (ярко-желтые оттенки), по периферии плутонов (темно-желтые и коричневые оттенки) и в роговиках (темно-коричневые), что видно на примере Лево-Жолакагского, Бургалийского и Верхне-Бургалийского плутонов ([рис. 77](#)).

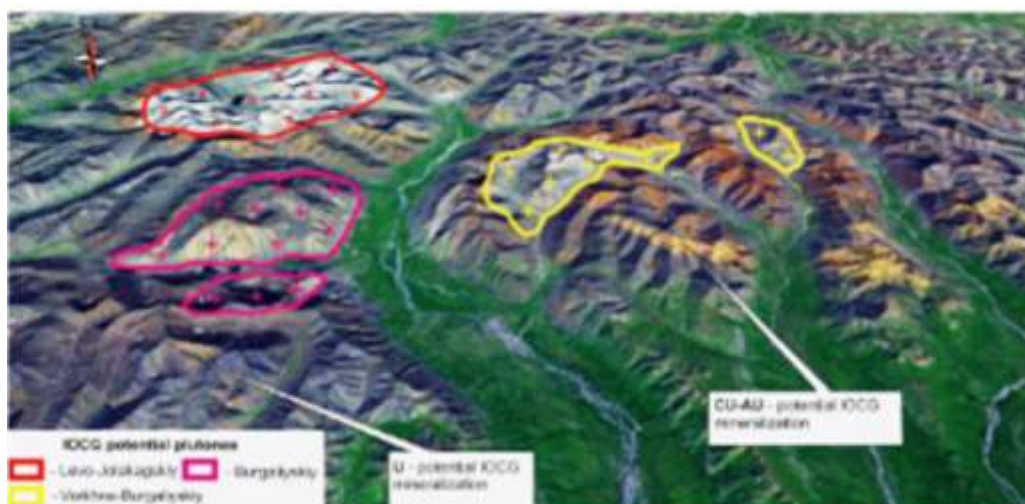


Рис. 77 Потенциал IOCG минерализации системы Лево-Жолакагского, Бургалийского и Верхне-Бургалийского плутонов по результатам ГИС-анализа на U и Au-Cu оруденение.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о том, что IOCG минерализация, широко проявляется на СВ России в Восточной Якутии, но ее экономический потенциал и геологические особенности неизвестны.

Поисковая модель IOCG минерализации была разработана с использованием методологии ГИС для определения интрузивных комплексов с более высокой перспективностью.

Потенциал IOCG минерализации оценивается как высокий. Так, Верхне-Бургалийский плутон содержит несколько потенциально продуктивных участков. Самый крупный из них площадью около  $135 \text{ км}^2$ , что может иметь запасы оксидов железа в несколько миллиардов тонн. Даже при низком содержании золота это может представлять экономический интерес.

Первое открытие в Восточной Якутии – богатое оксидами железа Реп-Юруинское рудопоявление с Au-U-Cu ( $\pm\text{V}\pm\text{Mo}\pm\text{W}$ ) минерализацией расположено в апикальной части известково-щелочного/щелочного плутона и интерпретируется как соответствующий аналог по типу месторождения Olympic Dam (Австралия).

Использование многомерного геометрического распределения повышает надежность оценки типа минерализации даже на ранних стадиях поисков с ограниченными данными.

## ИСТОЧНИКИ:

1. Abdolmaleki, T.M. Rasmussen, M.K. Pal. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXIV ISPRS Congress 2020*.
2. Adrian Fabris, Simon van der Wielen, Tim Keeping, Georgina Gordon. *Deep Exploration Technology Cooperative Research Centre 2015*.
3. Alessandro Sandrin. *Printed by Luleå University of Technology, Graphic Production 2014*
4. BHP Billiton Annual Report 2010-2012,
5. Brotodewo, K. Tiddy, D. Zivak, A. Фа́брус, D. Джайлс. *MinEx CRC 2020*.
6. Corriveau, L, Ootes, L, Mumin, H, Jackson, V, Bennett, V, Cremer, J. F, Rivard, B, McMartin, I, Beaudoin, G. In "Proceedings of Exploration: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration" 2007.
7. Gregory L. Fernette U.S. Geological Survey, Reston, Virginia: 2015
8. Hayward and Skirrow 2010, Groves et al. 2010, Баспраков и др. 2007, Xavier et al. 2010, Belperio et al. 2007, Ehrig et al. 2013.
9. James Austin & Clive Foss. ASEG 2019.
10. Laszlo Katona. *Geological Survey of South Australia, Department for Energy and Mining. 2020*.
11. M. Simard . G. Beaudoin . J. Bernard . A. Hupé. *Miner Deposita 2006*.
12. Oliver et al., 2004, Lyons, Goleby 2005; Heinson et al. 2006; Direen et al. 2007,
13. Rahul Mukherjee, A.S. Venkatesha, Fareeduddinb. *Ore Geology Reviews, 2010*.
14. Roger G. Skirrow James Murr Anthony Schofield David L. Huston Simonvan der Wielen Karol Czarnota Rohan Coghlan Lindsay M. Highet Danie lConnolly Michael Doublier Jingming Duan *Ore Geology Reviews October 2019*
15. Sérgio Roberto Bacelar Hühn, Adalene Moreira Silva, Francisco José Fonseca Ferreira and Carla Braitenberg *Minerals 2020*
16. Tristan M. Childress, Adam C. Simon, Martin Reich Fernando Barra Mauricio Arce Craig C. Lundstrom, Ilya N. Bindeman. *Mineralium Deposita (2020)*
17. Williams et al, 2005, Hitzman and Valenta 2005,
18. А. Костин; А. Ведяев; Г. Рафат. *JS Afr. Inst. Мин. Металл. 2014 г.*
19. Бутрой Эмили, Бодуан Жорж, Барнс Сара-Джейн и Корриво Луиза. *Минералогический журнал 2012*.