

Новый технологический подход, необходимый для горной промышленности

New technology approach needed for mining industry

Rob Gordon* из Quantec Geoscience, Торонто, Канада, заявляет, что улучшение результатов шахтной разведки возможно только с принятием новых геофизических и других технологий.

Фундаментальные технологии шахтной разведки наконец могут извлечь пользу из опыта нефтяной промышленности. Технологии, используемые в трехмерных сейсмических системах, теперь были применены для электрического отображения недр. Последние продвижения в цифровой обработке сигналов и более быстрые компьютеры, вместе со способностью получения высокоразрешенных и глубинных геофизических данных, означают, что контрасты физических свойств теперь можно выявить при поверхностных наблюдениях с невиданной ранее точностью и глубиной. Это дает новые возможности для дальнейшего геофизического исследования разрабатываемых районов на больших глубинах до бурения. Сегодня требуется, чтобы затраты на исследования приносили максимальную пользу и более реализуемые результаты. Теперь горная промышленность может систематически изучать поверхность при поиске рудных тел, по существу по ходу отбраковывая неблагоприятные участки. Кроме того, поскольку нефтяной сектор продолжает искать усовершенствования в технологиях для повышения доли успешной разведки, снова обратились к экспериментам с электрическими методами. Эта технология должна стать весьма интересной группам, думающим о будущем, из обоих секторов.

Сделать открытие месторождения сложно и возможно очень сложно, поскольку неоткрытые залежи сегодня более вероятно обнаружить на больших глубинах. Финансовый риск глубокого бурения затрудняет глубинную разведку.

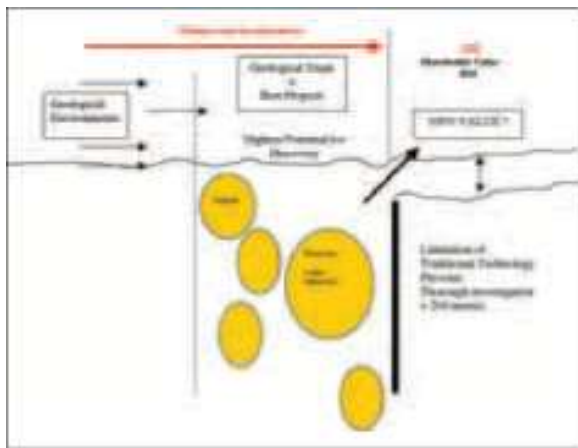


Рис. 1. Бизнес разработки и разведки, открытие и извлечение полезных ископаемых.

Однако горная промышленность была традиционно вялой для принятия новой технологии, особенно, если ее не так легко понять или когда парадигма стоимости не стыкуется с традиционным соотношением расходов на бурение и другие технологии. Планирование бурения должно быть более точным для обеспечения лучшей отдачи каждого пробуренного метра. Области с большим потенциалом могут быть недоразведанными. Экономисты часто заявляли, что крайней несостоятельностью разведки является неэффективность, даже при работе в высокоперспективных районах. Сегодня отображение среды до глубин более чем 1500 м может обеспечить глубинную разведку в пределах благоприятных комплексов. Кроме того, теперь технология позволяет возобновить разведку на разрабатываемых рудниках. «Восходящая» разведка в противоположность «нисходящей» начинает удовлетворять экономическим интересам, связанным с риском бурения и скоростью открытия.

Существует несколько глобальных целей разведки и разработки. В основном, бизнес снабжает нас большинством необходимого сырья. Однако ведущие элементы сегодняшней деятельности по добыче экономически связаны с акцентом на обеспечение положительного денежного потока, постоянно увеличивающего стоимость акций, и максимальную рентабельность инвестиций. Разведчики недр, геологи и разведочные группы озадачены обеспечением ввода в разработку наиболее перспективных геологических сред в мире.

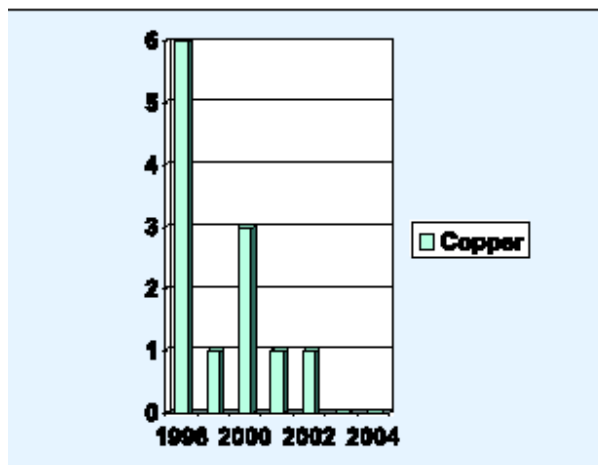


Рис. 2. Глобальные месторождения меди. Стратегический отчет Metals Economics Group, май/июнь 2004.

* E-mail: rgordon@quantecgeoscience.com.

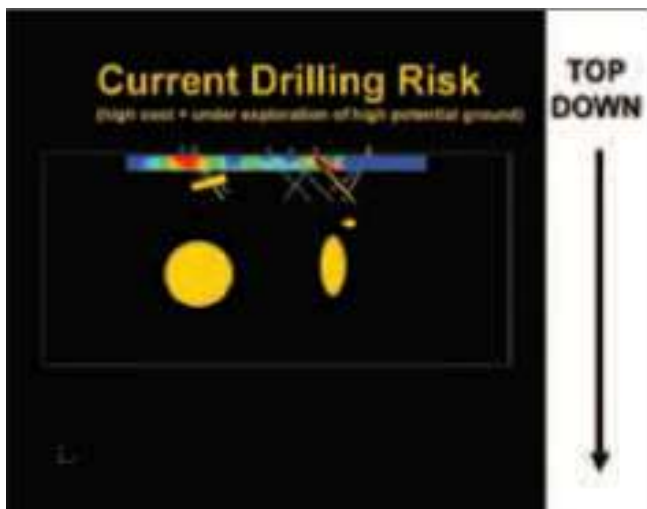


Рис. 3. Традиционная нисходящая разведка, высокий риск бурения и неполная разведка.

При эффективной разведке эти среды, которые можно рассмотреть как ключевые активы корпорации, могут обеспечить компании большим доходом. Любое дополнительное открытие может обеспечить дополнительную прибыль компании и снабдить солидным доходом акционеров. По существу, наука разведки комплексом методов — основа горного дела. Это графически показано на рис. 1.

Однако разведка высокоперспективных объектов часто считается очень рискованной. Это обосновано тем, что доля открытия рудных тел в общем случае очень мала и цена эффективной разведки таких объектов до настоящего времени была очень высока. К счастью для науки разведки, бизнес-модель расходов на разведку начала развиваться с середины 1980-ых, когда проводилось очень мало исследований, не связанных с разработкой. Сегодня все молодые рудные компании строго финансируются для инвестирования в эту рискованную область.



Рис. 5. Распространенная схема наблюдений DCIP и MT Titan 24. Одновременно могут проводиться обе съемки в течение 24 часов или в режиме отдельно MT или DCIP.

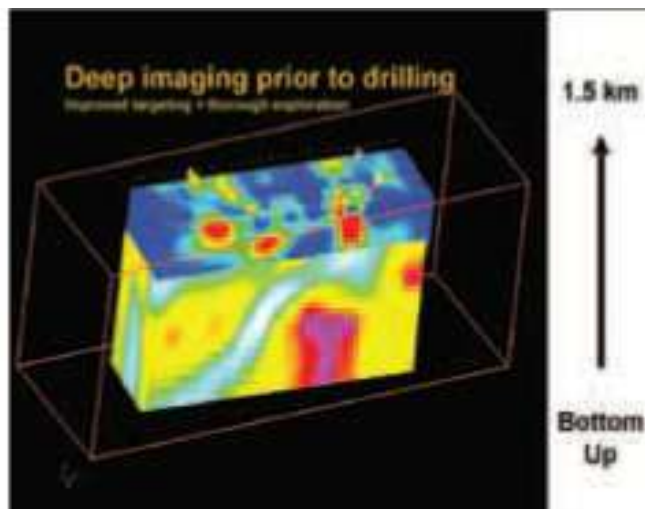


Рис. 4. Новый восходящий подход разведки обеспечивает более полную и экономически эффективную разведку.

Есть и другие факторы риска, кроме основных, упомянутых выше. Какова реальная цена разведки, если свойства среды эффективно не исследованы и потенциальные отложения остались в земле, и как это соотносится с профилем риска разведки компаний? Имеет ли значение, какую компанию финансирует инвестор? Известно, что рудные месторождения открыты в пределах земной коры. Большая часть разведочного бурения и расходов направлена на исследование глубин около 200 м. До настоящего времени, поверхностные и приповерхностные наблюдения были полезны в обеспечении разумной доли открытий, и позволяли удовлетворять все более растущую глобальную потребность в сырье. Однако впоследствии было открыто много крупных залежей ниже 200 м и, статистически, еще имеется много залежей в интервале глубин 200-1000 м. Интересно рассмотреть общее количество открытий медных месторождений в течение года (рис. 2), которые были сделаны с 1998 г. (шесть) до 2004 г. (одно). Спад может быть обоснован двумя факторами: 1) суммарные затраты на разведку оказались меньше, чем в течение предыдущих шести лет, и 2) имеется тенденция углубления новых открытий, то есть наши разведочные программы становятся менее эффективными.

Суммарный эффект разведки при наших текущих разведочных процессах будет таким, что перспективные области в трехмерной системе не будут полностью исследованы. Бурение, таким образом, остается очень рискованным, поскольку объем отбора образцов небольшой и малая доля успешных открытий обеспечивает небольшой доход для акционеров.

Самая главная проблема разведки — быть эффективной в понимании относительного потенциала разведываемой области, его оценка и прогноз того, перейдет ли программа разведки на более благоприятную фазу так быстро, как это возможно. Чем скорее будет выполнена эффективная оценка параметров среды, даже если нет открытия, тем меньше будет потеря времени и поэтому меньше полная стоимость. Один из взглядов на процесс заключается в том, что мы должны потерпеть неудачу быстрее, если мы, в конечном счете, собираемся вкладывать в разведку любого месторождения.

Продвижения различных технологий продолжают вносить свой вклад в наши усилия по разведке, а именно сокращают время выполнения задач. Необходимо сочетать несколько технологий, чтобы улучшить эффективную глубинную разведку. Однако применение новых технологий не обязательно означает, что немедленно последуют новые открытия. Поскольку мы пробуем отобразить среду все глубже и выявить новые способы эффективного бурения, то мы часто будем сталкиваться с неожиданными проблемами. Это делает отдельное применение технологии сложным и его использование может потребовать отладку способов выполнения, изучая новые понятия и научные основы.

Для использования преимуществ новых глубинных методик разведки и продвижений, которые были сделаны в вычислительной области, связанных со скоростью обработки и возможностями инверсии, важно, чтобы геологи, геохимики и геофизики перестали работать отдельно друг от друга, и попытались устранить пропасти, постоянно существующие между дисциплинами. Такие же продвижения, которые делаются в области нанотехнологий для междисциплинарного пространства химии, физики, инженерии и биологии, должны происходить и в пределах геологических дисциплин. Фактически, некоторые шаги в этом направлении сделаны в недавно изданной периодической системе химических элементов для специалистов в области наук о Земле (Railsback, 2003). Здесь элементы собраны в группы в зависимости от заряда и притяжения, а не от традиционно используемой для группировки атомной массы. Таблица показывает, что притяжение и заряд связаны с минеральными скоплениями. Это элементарное наблюдение существенно и помогает геофизику работать с дополнительными параметрами, интересными для геологов, такими как ореолы изменения и химические градиенты. Это также показывает сложную взаимосвязь физики и химии, и демонстрирует потенциал геофизики для более точного картирования геологической среды, а не общую попытку просто обнаружить интересующую геологическую особенность.

Все это подтверждает только то, в насколько сложном пространстве мы работаем. Поскольку от геологоразведчика требуют данные со все больших глубин коры, существует растущее давление на геофизическое сообщество для разработки более совершенных разведочных методов. Поскольку методы для измерения физических свойств пород становятся более точными, важно связать их с геологией настолько, насколько это возможно.

Новая технология

Обращение команды геологов к правильной среде и локализации — только первый шаг. Способность полного исследования некоего объема земной коры насколько возможно быстро должна стать главной целью любой разведочной команды. Исторически, из-за ограничений технологии и экономики, преобладающий подход включал традиционную последовательность наземных наблюдений, бурения, а затем повторение процесса для определения наиболее экономически выгодной глубины для добычи ископаемого.



Рис. 6. а) Приемные модули могут быть расположены на открытой воде. б) Бригады регистрируют данные в наиболее жестких поверхностных и погодных условиях. в) Самая современная обработка цифрового сигнала данных полного колебания волны означает, что система может применяться при разведке в районах промышленной застройки (около шахты), где искусственные помехи обычно делают традиционные подходы неэффективными.

Геофизика для разработки месторождений

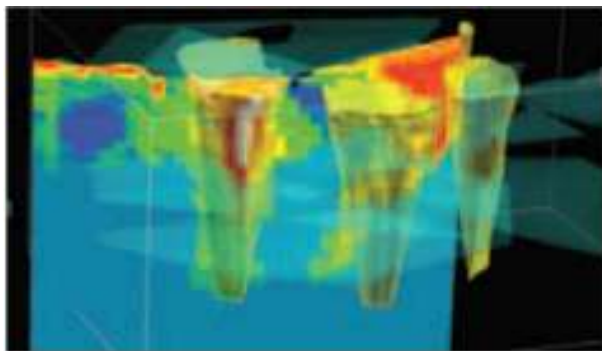


Рис. 7. Результаты съемки, описанной на рис. 6с: ограниченные данные магнитотеллурической инверсии. Целью исследования было картирование боковых стенок кимберлитовых трубок на глубине для целей разработки месторождения. Данные предоставлены Debeers.

Этот процесс может быть рассмотрен как нисходящий подход. Однако он может иметь некоторые существенные экономические недостатки, особенно в терминах временных затрат. Картирование поверхности и данные аэрогеофизических наблюдений могут направить разведочные усилия приблизительно в перспективную область, однако перспективный объект может находиться под покровом (например, морены) и вне границ геологической модели и первичных геофизических съемок. Положения проектных скважин смещают на позиции, где все геолого-геофизические данные, такие как дорогостоящие аэросъемки, показывают аномалии. Проблема заключается в том, что высокоперспективные области остаются неразведанными. Поскольку дальше применяется бурение, проходит больше времени, затраты растут и, во многих случаях, не удастся открыть месторождение.

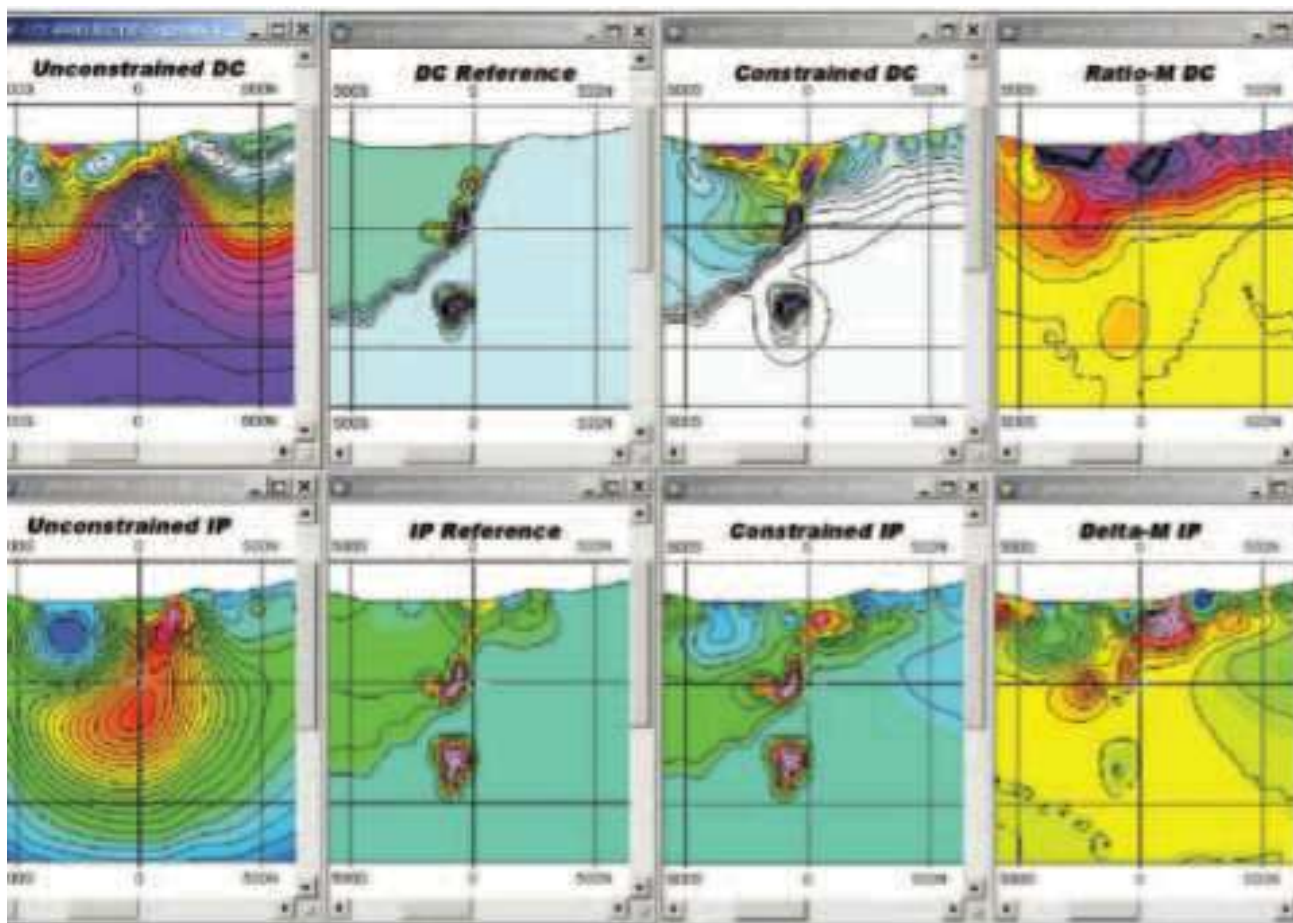


Рис. 8. Глубинные инверсии данных DCIP (метод вызванной поляризации на постоянном токе — ВП) для типичных глубин около 750 м, результаты съемки методом сопротивлений на постоянном токе приведены наверху, снизу — поляризуемость. Результаты произвольной инверсии для глубинных (750 м) наблюдений DCIP показаны слева. Опорные изображения — то, что мы полагали известным (2-ой слева) на основе геологических и геофизических данных. Для инверсий с ограничением используют опорные модели в качестве отправной точки и по существу они ограничены известным геологическим строением. Справа мы видим отношение ограниченного удельного сопротивления и опорной модели и разности между ограниченной ВП и опорной ВП. Эти результаты снабжают информацией, освещающей районы для дальнейшей разведки. Например, если опорная модель объясняет всю отображенную информацию, то дальнейшее исследование, использующее эти параметры не гарантировано. (Данные приведены с разрешения рудной компании FNX и OMET.)

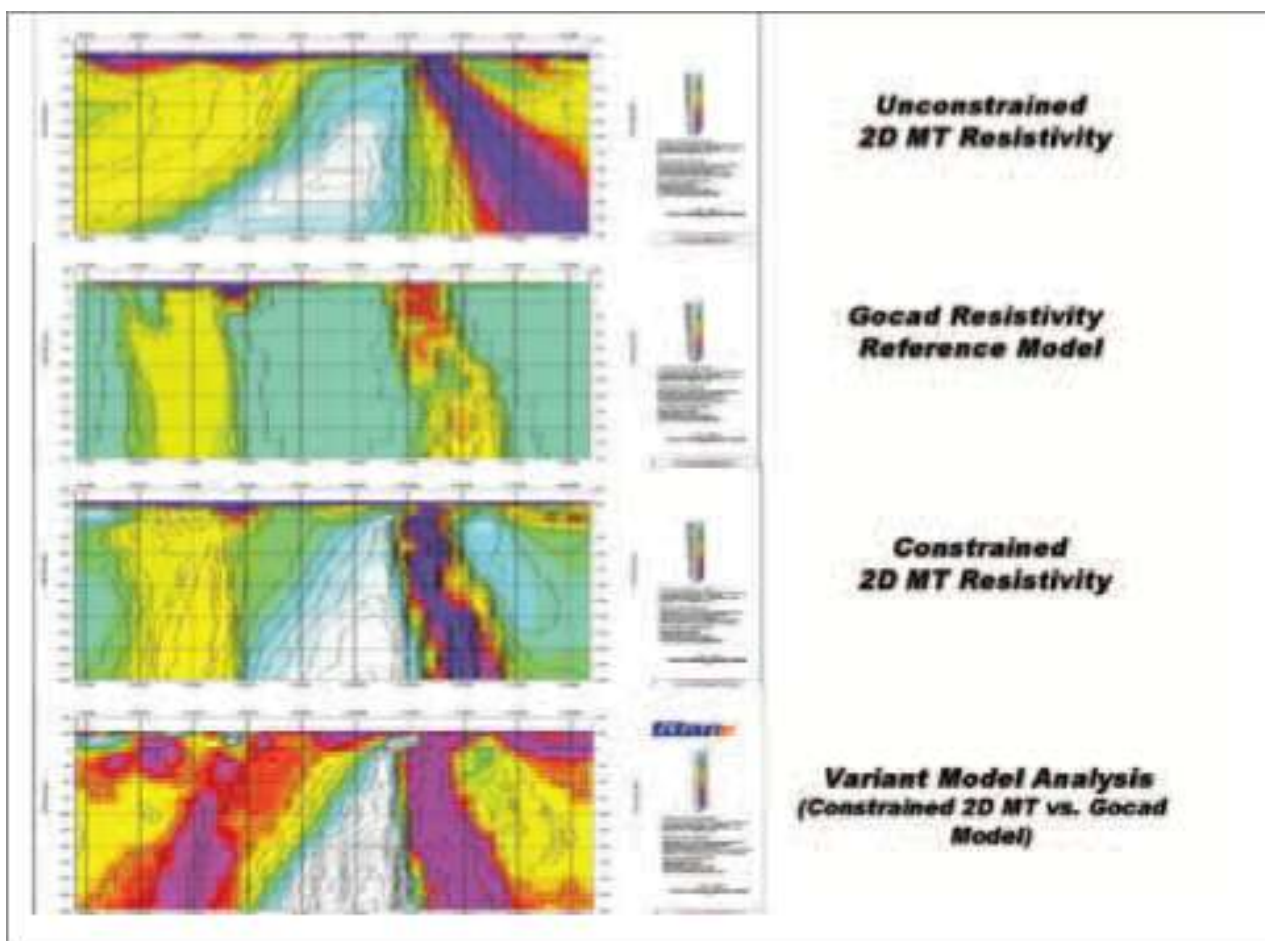


Рис. 9. Данные удельного сопротивления показаны для глубины 2 км. (Открытая информация, предоставленная Ontario Mineral Exploration Technologies OMET. Программ Legault и др., 2002).

Новый восходящий подход полагает, что результаты выделения геологической командой потенциально рудной области являются корректными, и направлен на систематическую проверку геологической модели на всей области. Этот радикально новый подход актуален благодаря продвижениям нескольких технологий. В частности недавно стало возможным глубинное отображение среды электрическими методами с использованием распределенных геофизических систем. Это дает глубинные изображения, порядка 1 км, ключевых физических параметров, таких как удельное сопротивление и поляризуемость. Комбинация опытного управления проектом и программного обеспечения для визуализации с методами глубинной разведки, параметры физической геологии и другие геофизические данные, все это снабжают способом детального исследования объемов среды в трех направлениях до глубин от 750 м до 2 км (Gordon и Leriche, 2000).

Этот процесс обращается к некоторым важным вопросам разведки, которые связаны с преодолением ошибок, связанных с очень ненадежными процессами, связанными с разведкой (Mackenzie, 1987). Первой ошибкой является ложный пропуск сигнала, означающий решение о негодности, когда гипотеза истинна, есть рудное тело; и вторая ошибка — ложное обнаружение сигнала, означающее решение о годности, когда гипотеза ложная, рудное тело отсутствует. Способность отображать на глубине и видеть, существует ли рудное тело, или ограничены ли объекты с глубиной до бурения обеспечивает более совершенное планирование и

быстрое принятие решений. Это также касается проблемы первой ошибки, без глубинного бурения.

Приложения

Хотя на основе собственно геофизических разведочных методов невозможно получение изображения, прямо связанного с геологией, эти изображения являются наиболее усовершенствованными (из имеющихся) ключами к глубинам геологической среды. Вообще говоря, большие экономические рудные месторождения большинства типов создают аномалии на фоновых геофизических сигналах таким способом, что характерная идентифицируемая аномалия должна дать отправную точку для эффективной разведки.

Один из примеров — Titan 24, распространил системы наблюдения для МТ и ВП. Они обеспечивают многопараметрическими данными удельного сопротивления по ВП, поляризуемости и глубинными данными удельного сопротивления по МТ, зарегистрированными одновременно на больших расстояниях в течение 24 часов. Большой размер расстановки вносит свой вклад в глубинные исследования методом ВП до глубин порядка 700 м. Большой объем данных, улучшенная обработка сигналов и увеличенный размер расстановки обеспечивают точными глубинными изображениями среды для ключевых физических параметров. Преимущества измерения при очень близко расположенных центрах расстановки магнитотеллурических наблюдений одновременно в

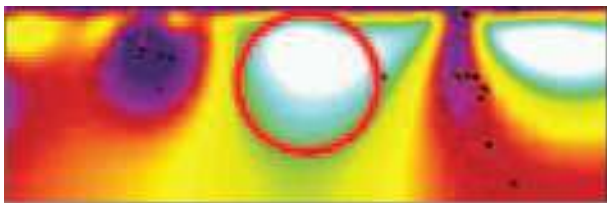


Рис. 10. Распределенное глубинное отображение среды — геоэлектрический разрез. Пятикилометровый разрез до глубины 800 м области Kidd Creek Mine (вулканогенная массивная залежь сульфидов). Съемка смогла пробить толстый слой (50 м) проводящих покрывающих пород. Контрольная съемка оказалась успешной в распознавании всех известных поисковых объектов, предварительно пробуренных до глубины 800 м. Было обнаружено наличие минеральных отложений Chance (слева), которые не выявлялись с помощью традиционных методов ВП и электрического профилирования из-за толстого слоя проводящих отложений. (Открытая информация, предоставленная Ontario Mineral Exploration Technologies OMET. Программ Legault и др., 2002).

постоянного естественного поля приводят к получению высококачественных данных и улучшенному латеральному разрешению по сравнению с более традиционными подходами сбора данных.

Максимальную прибыль из этих новых глубинных геофизических изображений можно получить при интеграции этих данных должным образом с геологической информацией. Ограниченная информация полезна, когда имеется большое количество априорной информации в пределах области или геологическая модель является корректной. В рядовых случаях ограниченные изображения используются после бурения первой скважины для дальнейшего уточнения изображения геологической среды. Для первичного ограничения, в качестве исходной модели можно использовать геологические предположения и оценки физических параметров.

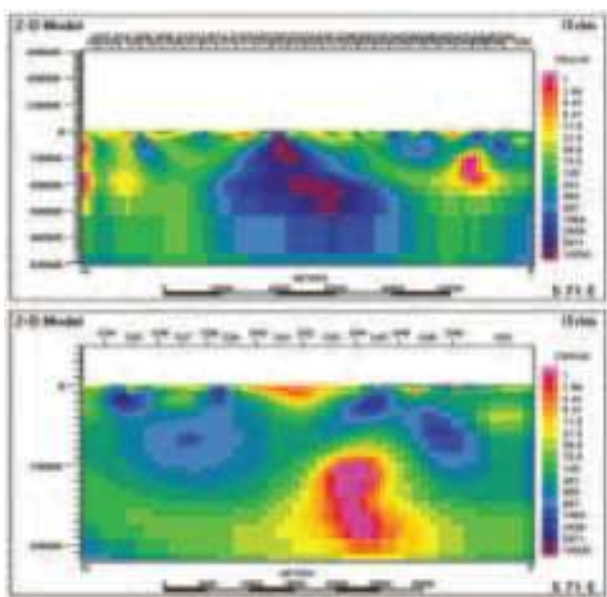


Рис. 11. Региональный разрез запада США, глубина до 20 км (увеличен нижний интервал).

Уточнения модели, приводящие к более точным результатам, получены последовательным добавлением геологических границ и физических параметров, измеренных посредством геологического картирования и каротажа в скважинах, а также измерением физических свойств образцов, извлеченных из скважин. Сравнение результатов ограниченных геофизических инверсий с геологической моделью позволяет разведочной команде увидеть области, где модель нуждается в уточнении посредством дальнейшей разведки. Это позволяет обозначить дальнейшие цели проекта (Рис. 8 и 9).

На начальных этапах применения технологии стало ясно, что подобное отображение среды могло сохранить миллионы долларов, израсходованных на бурение в районе месторождения Falconbridge Kidd Creek, если бы данная технология существовала 15 лет назад. Область в процессе разведки была активно разбурена, поскольку это была «близкой к успешной» и перспективной областью, однако успешные результаты так и не появились. (Рис. 10)

Применение для разведки нефти, природного газа и геотермических источников

В нефтегазовой отрасли 3D сейсморазведка обеспечивает компании большой долей успеха разведки. Однако после того как геологические задачи стали все более сложными, там вырос интерес к другим методам разведки геологической среды. Получая и обрабатывая большие кубы трехмерного удельного сопротивления до глубин более чем 1500 м и привязывая их к сейсмическим реперам, можно получить больше информации, которая может помочь в разделении непродуктивных и продуктивных скважин или даже скважин, которые не окупаются. Например, соляной купол, заполненный водой должен показать различные характеристики удельного сопротивления, чем купол, заполненный газом. Кроме того, точное картирование удельного сопротивления с высокой плотностью дает информацию со значительных глубин об осадках в комплексных средах, где нефтяной и газовый потенциал высок, но 3D сейсмика имеет проблемы с разрешением ниже мощного комплекса кристаллических вулканических пород.

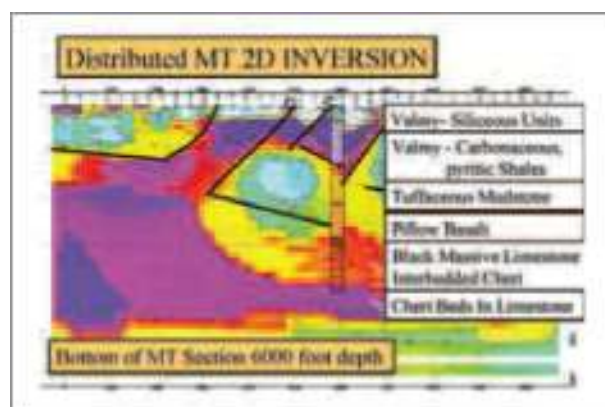


Рис. 12. Структурное картирование, Carlin Trend, запад США, основные сейсмические границы показаны черными линиями.

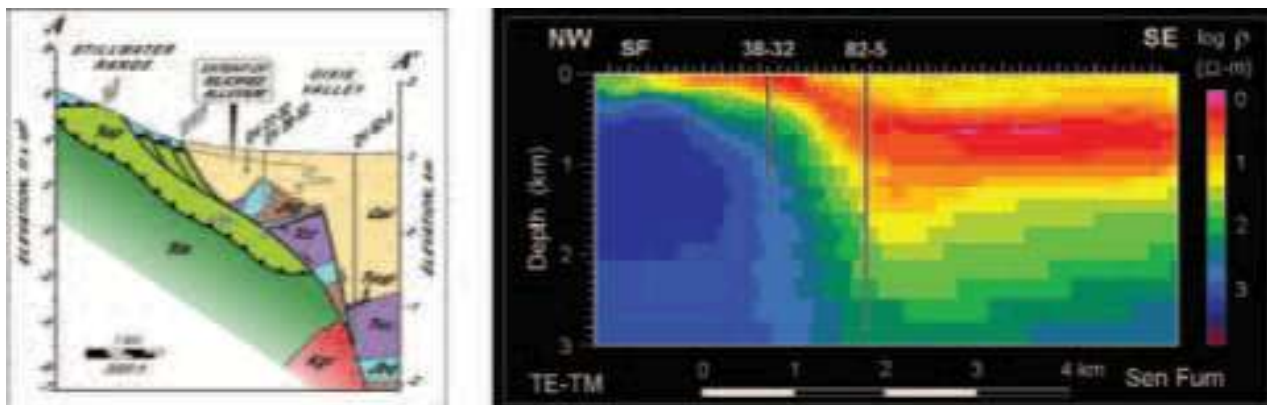


Рис. 13. Геотермическое приложение для картирования геологической структуры в Senator Fumaroles, Dixie Valley, Stillwater Range, запад США.

Другими словами, нефтяная промышленность действительно имеет некоторые сходства с горной промышленностью. Возможно, самым необычным является тенденция компаний все время придерживаться тех методов, которые работают. Для горной промышленности наглядная геология и бурение до настоящего времени были самым успешным подходом. Так, при предложении попробовать что-то новое, люди имеют тенденцию держаться за опробованные и верные методы. В нефтяном секторе, сначала 2D, а затем 3D сейсморазведка и продвижения в обработке стали опробованными и верными методами. Все же, есть экспериментирующие люди, и стремительное продвижение технологии обычно наступает при сделанных новым методом открытиях.

Заключение

Каждое значительное продвижение технологии, особенно геофизической, вызывало повышение доли успешных открытий за счет более точного расположения скважин. Наше освещение верхних 200 м было относительно эффективно в течение более чем 2000 лет. Вероятность открытия рудных месторождений на глубинах более 200 м увеличивается благодаря самым последним геофизическим методам отображения среды и другим продвижениям в области трехмерного моделирования геологической среды и компьютерной инверсии.

Некоторые из самых больших проблем минерального сектора остаются открытым вопросом для разведки. Этот вопрос задают все больше по мере истечения времени и отсутствия новых открытий. Кроме того, из-за финансовых ограничений, давящих на большие добывающие корпорации, разведка часто считается необходимым злом, которое просто крадет деньги из чистой прибыли. Пока открытие месторождения воспринимается как некоторая форма интуитивной прозорливости, обоснование технологии будет становиться все более сложным. Если каждый год некоторая положительная технологическая причина будет приписана успеху разведки, то мы все сможем чувствовать немного спокойнее относительно работы, хотя и с небольшой зарплатой. По существу, промышленность должна продемонстрировать, что разведка может быть эффективной. Продвижение этих и других технологий, и рост дополнительной информации о взаимосвязях между химией, физикой и геологией, является путем помощи бизнесу разведки и демонстрации того, что процесс разведки может снизить риск и, в конечном счете, обеспечить больший доход в более коротком цикле.

Есть место для оптимизма. Quantec обнаружила, что после 4 лет применения при более чем 120 съемках по всему миру, его технологическое решение принимается настолько, насколько оно сейчас раскрывает свои возможности — сейчас они ждут первого применения для разведки углеводородов в секторе разведки и разработки.

Ссылки на литературу

- Gordon, R. L. [1999] Improving profitability through better ore delineation and minimising dilution. *Canadian Institute of Mining, 14th Mine Operators Conference, Bathurst 99*, 29, Bathurst, New Brunswick.
- Legault, J.M., Gordon, R., Reddig, M., and Slama E. [2002] Geophysical survey interpretation report regarding the Quantec Titan-24 distributed array system tensor magnetotelluric and DCIP resistivity surveys over the Kidd Creek mine project, Kidd Twp., near Timmins, ON, on behalf of Ontario Ministry of Northern Development and Mines and Falconbridge Ltd (OMET project 13-2001 a), Toronto. *Quantec Geoscience. internal company report*, 99, QG-215.
- Mackenzie, B.W. [1987] Looking for the improbable needle in a haystack: the economics of base metal exploration in Canada. Reprinted in Anderson, F., (Ed.), *Selected readings in Mineral Economics*. Pergamon New York, 36-61.
- Manske, S.L., and Paul, A.H. [2002] Geology of a major new porphyry copper center in the Superior (Pioneer) District, Arizona. *Economic Geology*, 97, 197-220.
- Metals Economic Group [2004] *Strategic Report for 2003*. 17, 3, 3.
- Railsback, L.B. [2003] An earth scientist's periodic table of the elements and their ions. *Geology*, 31, 737-740.