

Рудная геофизика

Разработка скважинного гравиметра для применения в горнодобывающей промышленности . Development of a borehole gravimeter for mining applications

Chris Nind¹ и Harold O. Seigel² (Scintrex) и Michel Chouteau³ и Bernard Giroux⁴ (Ecole Polytechnique de Montreal) излагают предпосылки применения нового гравиметра, базирующегося на испытанной технологии кварцевой системы, небольшой диаметр которого позволяет производить измерения в промышленных разведочных скважинах на глубинах до 2 км. Гравиметр обеспечивает ту же чувствительность, что и современные наземные гравиметры.

Вариации гравитационного поля Земли отражают распределение геологических пород различной плотности. Эти вариации в настоящее время наблюдаются посредством чувствительных приборов, гравиметров, на поверхности земли, а в последнее время и в воздухе с аппаратурой, установленной на самолетах. Применение таких измерений в горнорудной промышленности играет важную роль при поисках, оценке и разработке минерально-сырьевых ресурсов, включая металлические и неметаллические полезные ископаемые.

На сегодняшний день состояние развития наземных гравиметров может обеспечить чувствительность порядка миллиардных долей нормального земного гравитационного ускорения (микрогаллы). Однако до настоящего времени из-за их больших размеров использование таких гравиметров в горной промышленности ограничивалось наземными измерениями, или изредка в обширных подземных выработках, таких как стволы шахт и штольни. Наземные гравиметрические измерения, как и следовало ожидать, дают больше информации о распределении плотностей пород, залегающих ближе к поверхности, чем о породах на больших глубинах. В настоящее время общепринятая практика работы для определенных видов полезных ископаемых на известных рудниках состоит в исследовании и разработке их на глубинах до 1-2 км под поверхностью земли. Гравиметрические измерения, проведенные на поверхности земли, оказывают небольшую помощь при работе на таких глубинах. Значительная польза может быть получена от развития гравиметрических измерений в скважинах. Скважинные гравиметрические измерения отражают распределение плотностей горных пород на глубине с большей чувствительностью и пространственным разрешением по отношению к объекту исследования, чем наземные измерения. В сочетании с геологической информацией и другими геофизическими характеристиками непрерывно записанные на каротажную диаграмму гравитационные данные обеспечивают исходную информацию для трехмерного количественного моделирования находящейся под поверхностью геологической среды. В дополнение к обычному разведочному применению скважинные гравиметрические измерения способны обеспечивать количественную информацию об объемной плотности пластов, пересекаемых скважиной. На некоторых этапах разработки полезных ископаемых, включающих анализ ископаемых, планирование шахт и контроль качества, важно иметь точно определенное значение объемной плотности руды.

Smith (1950) представил аргументы в пользу сбора гравиметрических данных в скважинах. Несколько лет спустя LaCoste&Romberg создали скважинный гравиметр для применения его при поисках и разработке нефтепродуктов. Гравиметр был запущен в серийное производство Edcon в 1970 г. (Herring, 1990). Van Popta и др. (1990) описали результаты скважинной гравиметрической съемки для количественного определения вторичной газонасыщенности трещиноватых продуктивных известняковых пластов и дали рекомендации по усовершенствованию существующей методики. Большой диаметр и ограниченный предел автоматического нивелирования скважинного гравиметра L&R привели к невозможности его использования на большей части скважин небольшого диаметра, обычно используемых в горных работах. В настоящее время Sintrex разрабатывает гравиметр, основанный на испытанной технологии кварцевой системы, который имеет достаточно небольшой диаметр, чтобы проникать в разведочные скважины, обычно пробуренные для разработки месторождений полезных ископаемых; в то же время прибор сохраняет ту же чувствительность, что и современные наземные гравиметры. Одновременно в рамках этого проекта Sintrex работает с Ecole Polytechnique, Монреаль, над созданием комплекта программного обеспечения для интерпретации результатов каротажа и прогнозирования гравитационного поля под поверхностью земли на основании геологического моделирования.

Возможности применения

Существует два основных типа использования данных, которые могут быть получены по скважинным гравиметрическим измерениям. Первый тип может быть назван «дистанционным обнаружением», когда гравитационные данные обеспечивают информацию о распределении плотности в толщах пород в непосредственной близости к скважине и на расстоянии от нее. Для ознакомления с ранними результатами оценок глубины и формы аномальных масс см. Smith (1950). Данные «дистанционного обнаружения» позволяют исследователям, насколько это возможно, создавать трехмерное представление геологической среды под поверхностью земли, основываясь только на наземных гравиметрических наблюдениях, но с намного большей пространственной разрешающей способностью и чувствительностью к более глубинным структурам.

1 cnind@scintrexltd.com.

2 hseigel@rogers.com.

3 chouteau@geo.polymtl.ca

4 giroux@geo.polymtl.ca.

Рудная геофизика

Второй тип использования связан с исключительно скважинными гравиметрическими измерениями, а именно, определение объемной плотности горных пород, пересекаемых скважиной. LaFehr (1983) и Li and Chouteau (1999) создали теоретическую базу для метода определения объемной плотности. Ими показано, что, если мы измеряем гравитационное поле на двух различных уровнях в скважине и вычитаем вертикальный градиент аномалий силы тяжести в свободном воздухе, полученная разность будет пропорциональна значению объемной плотности пластов между двумя уровнями в окрестности с радиусом, в пять раз превышающим расстояние по вертикали между пунктами измерений (Herring, 1990). Уравнение, связывающее аномалии в свободном воздухе с поправкой за градиент поля силы тяжести (g' в микроГал/метр) со значением объемной плотности (d в г/см³) пластов между двумя уровнями и G , универсальной гравитационной постоянной, записывается следующим образом:

$$d = g' / (4\pi G) = 0.01193 \text{ g} \quad (1)$$

Значение объемной плотности, полученное по этой формуле, будет теоретическим значением, так как обычно геологические формации, пересекаемые скважиной, не являются однородными и горизонтально-слоистыми. Однако оно дает исходное значение для интерпретации скважинных гравиметрических данных, что было использовано LaFehr (1983) и Li and Chouteau (1999).

Чтобы определить относительную точность определения d по таким измерениям, мы можем принять стандартное отклонение (SD) отдельных гравиметрических измерений равным 5 микроГалам, так что SD разницы между двумя такими измерениями должно быть 7 микроГал. SD положения каждой точки измерения предполагается равным порядка 5 см, и разница между такими измерениями должна быть равна 7 см. Если мы предполагаем, что расстояние по вертикали, требуемое для определения плотности, равно 5 м, тогда SD измерения объемной плотности пород в пределах около 25 м в скважине будет 0.02 г/см³.

Мы теперь обсудим некоторые возможные специфические приложения скважинных гравиметрических наблюдений при разработке полезных ископаемых в каждом из двух вышеупомянутых типе.

Дистанционное обнаружение

Массивные сульфидные месторождения

На многих разрабатываемых месторождениях ресурсы полезных ископаемых, обнаруженные по результатам исследования и разведки на поверхности, исчерпаны и ведется поиск дополнительных запасов бурением на глубинах, иногда превосходящих 2 км (например, Салливанское (Sullivan body extensions) месторождение и месторождение никеля в Садбери (Sudbury)). Чтобы обнаружить линзы сульфидов, которые не подсечены скважиной, в таких разведочных скважинах часто используется скважинный электромагнитный каротаж. ЕМ (электромагнитные) аномалии не дают ни надежных оценок масс источника обнаруженной аномалии удельной проводимости, ни представления о том, является ли источник сульфидным телом, металлическим проводником, таким как графит, или зоной интенсивно рассланцованных пород. Скважинные гравиметрические измерения, проведенные в качестве дополнения к ЕМ каротажу, помогают ответить на эти вопросы. Скважинные гравиметрические измерения позволяют рассчитывать избыточные массы и, когда проводится каротаж нескольких скважин, проводить трехмерную реконструкцию месторождения.

Типичный гравитационный эффект при скважинной гравиметрии от массива сульфидов, не подсеченного скважиной, характеризуется увеличением значений аномалии силы тяжести над центром масс тела и уменьшением значений под ним. Точка перегиба отмечает приблизительную глубину центра масс, а длина отрезка прямой между пиками аномалии позволяет оценить расстояние от скважины до центра масс. Если скважина не распространяется глубже центра масс, то наблюдается только рост значений аномалий силы тяжести. Чтобы получить представление о величине амплитуд наблюдаемых аномалий, рассмотрим следующий пример.

Компактное единое массивное (10 мегатонн) пирротинное (Ni/Cu) тело с плотностью 4.6 г/см³, с центром масс на расстоянии 150 м от скважины будет создавать аномалию с полной амплитудой (от минимума до максимума) около 1000 микроГал. Если центр масс отнести на расстояние 300 м от скважины, мы получим аномалию с амплитудой около 250 микроГал, превышающей предполагаемую точность (10-20 микроГал) гравиметрических измерений, исправленных за влияние обычно принятых факторов.

Рудно-металлические тела, как правило, более сложные, чем этот простой пример, и могут быть проявлены серией отдельных линз с карманами масс избыточной плотности, которые в зависимости от их геометрии, могут быть закартированы скважинной гравиметрией как отдельные или совокупные блоки.

Проведено детальное моделирование гравитационного эффекта Inco's Kelly Lake Ni/Cu месторождения в бассейне Садбери. Результаты показаны ниже.

Другие типы месторождений металлических руд

Исследование других типов месторождений металлических руд может сопровождаться скважинными гравиметрическими измерениями всякий раз, когда существует значительный плотностной контраст между вмещающими породами и рудами. Примером руд повышенной плотности могут являться пластовые месторождения цинка в карбонатных породах, которые часто не обладают достаточной электропроводностью, если они имеют низкое содержание пирита или высокое содержание сфалерита. Таким месторождением являются пирамидальные рудные тела на Pine Point, Северо-Западный регион Канады (Seigel et al., 1968). Другими аналогичными примерами являются скарновые и другие типы месторождений Cu или Au, где руды с промышленно выгодным содержанием минералов связаны с зонами высокоокисного железа. Рудные тела пониженной плотности могут включать Au в высококремнистых или карбонатных измененных зонах вулканического происхождения и в зонах интенсивно рассланцованных пород.

Нерудные месторождения

Аналогичным образом может сопровождаться исследование нерудных месторождений скважинными гравиметрическими измерениями в случае, когда существует значительный плотностной контраст между вмещающими породами и объектами, представляющими интерес. Таким примером может служить использование скважинных гравиметрических измерений при бурении по равномерной сети для создания трехмерной модели кимберлитовых интрузивов на глубине.

Рудная геофизика

Кимберлиты часто имеют неустойчивые магнитные характеристики, в то время как их плотность обычно ниже плотности вмещающих пород. Применение геофизических методов для поисков кимберлитов в северной части Канады представлено Power и др., 2004. Высокая точность, с которой проводится скважинный гравиметрический каротаж (до 0.01 г/см³), может способствовать идентификации кимберлитовых разновидностей с меняющимся содержанием алмазов посредством анализа едва различимых плотностных вариаций.

Исследование наземных и аэро-гравитационных аномалий Результатом наземной и аэро-гравиметрической съемки при исследовании месторождений полезных ископаемых являются разнообразные аномалии силы тяжести. На некоторых месторождениях может быть первоначально проведено бурение на основании степени их проявленности в гравитационном аномальном поле. Предварительное разведочное бурение не всегда может удовлетворительно выявить источник гравитационной аномалии, особенно если последняя вызвана едва уловимыми изменениями объемной плотности в породах, залегающих под поверхностью земли, или если не точно определено положение аномалии. В таких случаях скважинный гравиметрический каротаж способствует принятию решения о необходимости проведения дополнительного бурения.

Определение объемной плотности и использование ее при разработке месторождений полезных ископаемых

Скважинный гравиметрический каротаж предоставляет горным инженерам возможность сделать предварительное определение объемной плотности пород, подсеченных скважиной, на месте их естественного залегания. Это определение во многих случаях имеет прямую экономическую ценность. Например, в случае магнетитовых или гематитовых залежей железных руд значения вертикального градиента аномалий силы тяжести непосредственно связаны с содержанием железа, даже когда эти два минерала присутствуют одновременно в рудной залежи. Поскольку магнетит имеет содержание железа на 3% больше, чем гематит (72.4% против 70.0%), он имеет также более высокую плотность (5.175 г/см³ против 5.10 г/см³). Конкретный объемный процент железа в разновидности каждой руды увеличивает объемную плотность руды почти на ту же величину.

Как правило, знание объемной плотности руды помогает улучшить качественный контроль при разработке месторождений полезных ископаемых разных типов, обеспечивая более точную оценку веса пород, в частности запасов разрабатываемой руды. Качественные оценки, основанные на колонковом анализе, могут быть завышены, если не принимается во внимание пористость руд.

По мере создания сети систематических данных плотности горных пород относительные плотности могут предоставить важные данные для оценки характера изменения пород в результате трещиноватости и выветривания. При разработке месторождений промышленных минералов объемная плотность пород в месте естественного залегания соотносится с их качеством. Например, при добыче открытым способом известняка плотность известняка определяет его качество (например, содержание глины) и, следовательно, экономическую эффективность использования его в качестве цемента или как строительного камня. При добыче открытым способом гранита и других кристаллических пород вариация объемной плотности в пределах интрузивного массива отражает изменение прочности пород и, следовательно, их качества как строительного материала.

© 2007 EAGE

Другим применением объемной плотности при разработке месторождений является мониторинг отвалов выработанных пород проведением регулярного гравиметрического каротажа в обсаженных скважинах. Изменение в наблюдаемой плотности на некотором участке скважины может отражать нарушения целостности отвалов, обусловленные проникновением воды или трещинообразованием под воздействием нагрузки. Конечно, такой тип мониторинга может применяться и не только при разработке месторождений, но и для других инженерно-геологических задач.

Поправки, вводимые в скважинные гравиметрические измерения

Необходимо вводить определенные поправки в скважинные гравиметрические измерения, чтобы получить искомый геологический эффект. Определение объемной плотности обычно требует введения более строгих поправок, чем дистанционное обнаружение. Чтобы получить чувствительность лучше 5 мГал, разность между двумя гравиметрическими значениями, измеренными на соседних пунктах, должна быть получена с точностью не хуже 7 мГал. Это определяет суммарное значение ошибки при введении поправок.

Глубина

Глубина является самым важным фактором. Точность вычислений объемной плотности требует точного определения разницы глубин, на которых проводятся измерения. Возрастание силы тяжести Δg между двумя положениями на расстоянии Δz по вертикали задается уравнением:

$$\Delta g = (0.3086 - 0.0838d) \Delta z \text{ in milliGal/m,} \quad (2)$$

где d – значение плотности пласта горных пород между двумя пунктами измерений в г/см³.

Если наклон скважин ϕ градусов, то

$$\Delta z = \Delta L \sin \phi \quad (3)$$

Где ΔL – длина между двумя пунктами измерений вдоль ствола скважины. Для корректировки ΔL могут быть использованы различные способы, единичные, или их набор, чтобы обеспечить точность глубины по вертикали. Например, датчик давления (на каротажном зонде), счетчик ролика каротажного блок-баланса (для кабеля длиной ΔL) плюс уклономер (с разрешимостью 0.5 градуса, на зонде); и CCL и/или индукционный датчик (на зонде), чтобы определить места соединений в обсадной колонне скважины. Первый график на рисунке 2 – вертикальный градиент аномалий силы тяжести в свободном воздухе, который должен быть соответственно исключен. Остаточный градиент прямо пропорционален объемной плотности между двумя пунктами измерения (1). Требуемая точность глубины по вертикали, следовательно, ~5 см (соответственно, расстояние между пунктами > 5 м).

Широта

Также как и измерения на поверхности Земли, гравиметрические измерения в скважинах будут изменяться с широтой Земли θ . Эти изменения задаются уравнением:

$$\Delta g = 0.813 \sin 2\theta - 1.78 \times 10^{-3} \sin 4\theta \text{ в } \mu\text{Гал/м} \quad (4)$$

Поправка за широту может быть до 0.8 мГал/м на средних широтах, но уменьшается по направлению к полюсам и экватору. Способы, использованные для определения широты для каждого пункта наблюдения, могут содержать в себе: каротажную регистрацию координат заданного положения (если возможно); и осевой индукционный датчик (феррозонд), расположенный внутри скважины, плюс счетчик ролика

Рудная геофизика

каротажного блок-баланса для измерения глубины по столбу.

Атмосферное давление

Рост атмосферного давления будет уменьшать значения наблюдаемых аномалий силы тяжести из-за увеличения массы столба воздуха над скважиной. Эффект задается уравнением:

$$\Delta g = -3.6 \text{ мГал/кПа} \quad (5)$$

Поправка за влияние атмосферного давления может быть введена, используя микробарометр в устье скважины. К тому же, когда датчик давления используется для измерения глубины, увеличенное атмосферное давление будет интерпретироваться как увеличение глубины пункта наблюдения и даст избыточную поправку для глубины. Эти эффекты суммируются и полный эффект задается уравнением:

$$\Delta g = -12.2 \text{ мГал/кПа} \quad (6)$$

Сползание нуля-пункта гравиметра

Поправка за линейное сползание нуля-пункта гравиметра вводится по повторным наблюдениям на базовом пункте, находящемся обычно в устье скважины, в начале и конце каротажного процесса.

Приливные движения Земли

Гравитационный эффект приливов компенсируется с использованием стандартного программного обеспечения, по формуле, опирающейся на время и долготу.

Топография поверхности Земли и подземных выработок

Скважинные гравиметрические измерения подвержены влиянию топографии поверхности Земли и подземных выработок в окрестности пункта наблюдения. Поправки могут быть рассчитаны, используя подпрограммы, заблаговременно включенные в программное обеспечение Ecole Polytechnique, местные топографические карты и трехмерную цифровую модель горных выработок.

Региональный градиент

В некоторых случаях может присутствовать значительный региональный гравитационный градиент, обусловленный крупномасштабными геологическими структурами. Их влияние должно быть исключено, либо опираясь на доступные региональные гравиметрические карты, либо измерением гравитационного поля на поверхности в широкой полосе с центром над скважиной. Эти поправки требуют знаний глубины и азимута скважины так же, как и для метода введения поправки за широту.

Системные технические требования

Разработка Системы Scintrex Gravilog началась в четвертом квартале 2005 года. Она охватывала участок скважины вверх по столбу, включая лебедку длиной 2000 м с кабелем из 4 тросов, датчик положения, подвод энергии; ударостойкую РС и внутрискважинный каротажный зонд. Системные технические требования суммированы в таблице 1.

Исследования на Kelly Lake

Существуют три основные методики вычисления гравитационного влияния 3D структур (Li and Chouteau, 1998). Модель так называемой «правильной прямоугольной призмы» вычисляет влияние тела суммированием эффектов от ряда правильных прямоугольных призм, аппроксимирующих тело. Модель

«правильных многоугольных призм» рассчитывает гравитационный эффект, суммируя эффекты от сети многоугольников (пластин), которые аппроксимируют геометрию и объем тела по глубине. Модель «многогранников» аппроксимирует тело сетью многогранников и вычисляет гравитационный эффект, используя интеграл по поверхности, рассчитанный от внешних, ограничивающих тело, граней. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. В основном на практике для вычисления гравитационного эффекта от трехмерных тел сложной геометрии применяются первый и третий методы. В этой статье мы смоделировали гравитационный эффект от известного рудного тела по результатам скважинных наблюдений, используя программу, основанную на правильной прямоугольной призме и учитывающую особенности, связанные с прохождением скважины через призмы (Li and Chouteau, 1998). Недавно создана новая версия, дополненная моделью многогранника. Новая программа моделирования теперь может обрабатывать дискретные структуры, используя произвольно выбранные многогранники, и вычисляет гравитационный эффект, применяя аналитическую зависимость, выведенную Singh and Gupthasarma (2001).

Смоделирован гравитационный эффект по скважинным наблюдениям Inco's (International Nickel Company), которые хорошо документировали Ni/Cu рудное тело Kelly Lake, расположенное на месторождении Садбери. Рудное тело содержит три различные зоны. Две меньшие зоны расположены на глубинах между 100 и 600 м. Основная зона находится на глубинах от 700 до 1600 м. Глубины измеряются от поверхности земли, которая расположена на высоте 200-300 м над уровнем моря. Границы тел определены по бурению и плотностям внутри зон, вычисленным для блоков 5 м × 5 м × 5 м по керновому и плотностному (гамма-гамма) каротажу. Плотность вмещающих изверженных пород около 2.8 г/см³, а плотностной контраст рудных тел с вмещающими породами изменяется от нуля до 1.3 г/см³.

Сложное строение рудного тела Kelly Lake наглядно представлено на рисунке, приведенном ниже. Гравитационный эффект от рудного тела сложный с аномалиями, указывающими на расположение внутри зон карманов с массами повышенной плотности. Мы использовали это реальное рудное тело для моделирования четырех различных вариантов, которые могли возникнуть при скважинных гравиметрических исследованиях. Смоделированы вертикальная компонента аномального гравитационного эффекта, g_z , и его вертикальный градиент, $\Delta g_z/\Delta z$, для эффекта от избыточных масс, предполагая, что введены все поправки, приведенные выше.

Рисунок 1 показывает ситуацию в случае с вертикальной скважиной, которая могла пропустить рудные тела Kelly Lake. Вертикальная компонента гравитационной аномалии, g_z , и вертикальный градиент, $\Delta g_z/\Delta z$, представлены в правой стороне рисунка 1 сплошной и пунктирной линиями соответственно. Вертикальная компонента гравитационной аномалии, g_z , положительна, когда гравиметр расположен выше кармана с породами высокой плотности, и отрицательна, если ниже, при прохождении напротив кармана с массами повышенной плотности.

Рудная геофизика

Техническое задание	
Чувствительность	Лучше, чем 5 μ Гал с 1-минутным временем считывания (1 μ Гал – 10^{-9} гравитационного поля Земли)
Диапазон измерения	7000 милиГал
Максимальный диаметр зонда	48 мм
Максимальная длина зонда	2 м
Максимальная глубина измерений	2000 м (скважина заполнена водой)
Минимальный диаметр скважины	BQ (60 мм) и NQ бурильная труба (57.2 мм)
Максимальное отклонение скважины от вертикали	от 60 градусов
Рабочий диапазон температур	ОС – +70С (нижняя часть скважины) –40С ÷ +50С (верхняя часть скважины, включая РС)
Определение глубины по вертикали	± 5 см (используя совместно датчик давления, датчик положения и наклономер и индукционный датчик (необсаженная скважина))

Таблица 1 Техническое описание гравитационных исследований в скважине

На этом профиле существует две опознаваемые аномалии gz. Близповерхностная аномалия имеет максимум (между пиками экстремальных значений) около 200 μ Гал на глубине около 300 м (поверхность на высоте 250 м от уровня моря) и с расстояниями между экстремумами 250 м. Вертикальный градиент, $\Delta g_z/\Delta z$, имеет положительный пик на глубине около 300 м, совпадающий с перегибом графика аномалии gz. Эти результаты указывают на присутствие масс избыточной плотности на максимальном расстоянии 180 м от скважины на глубине около 300 м. Скважина проходит между двумя близповерхностными зонами рудного тела в положении, указанном на рисунке 1. Вторая аномалия gz наглядно представлена на рисунке 1 на глубине около 900 м с амплитудой около 150 μ Гал и расстоянием между пиками около 400 м. На глубине около 850 м присутствует пик аномалии $\Delta g_z/\Delta z$. Эти результаты указывают на присутствие избыточных масс на максимальном расстоянии 300 м от скважины на глубине 850-900 м. На рисунке 1 четко видно, что гравитационный эффект, зафиксированный по скважинным наблюдениям, указывает на присутствие кармана с породами высокой плотности вблизи кровли более глубокой зоны рудного тела Kelly Lake. Это согласуется с плотностной моделью рудного тела. Скважинные гравиметрические данные на рисунке 1 четко указывают на присутствие близповерхностной и глубокой зон избыточных масс, находящихся на некотором расстоянии от скважины.

Рисунок 2 отображает случай наклонной скважины, которая пересекает одну из близповерхностных зон рудного тела. Аномалия gz вблизи пересечения скважины на глубине 375 м, имеет амплитуду (между пиками) около 150 μ Гал. Пик аномалии $\Delta g_z/\Delta z$ совпадает с перегибом аномалии gz. Гравитационный эффект от глубин с 375 м до 500 м сложный и показывает, что пересечение не является простым, а может на самом деле фиксировать множество отдельных линз с различной плотностью в пределах этого интервала глубин. Имеется очевидное доказательство присутствия другого массивного тела на глубине ниже аномалий gz и $\Delta g_z/\Delta z$ на каротажной диаграмме, наводя на мысль, что скважина должна быть продлена на большую глубину.

Рисунок 3 иллюстрирует случай скважины, которая не подсклала две близповерхностные зоны и остановилась вблизи основной более глубокой зоны. Аномалии gz и $\Delta g_z/\Delta z$ на каротажных диаграммах выявляют низкоамплитудный гравитационный эффект от удаленного тела избыточной плотности на глубине около 400 м. Основная особенность, интерпретируемая на этих каротажных диаграммах, заключается в присутствии избыточных масс под забоем скважины, четко указывающая, что скважина должна быть пробурена глубже.

На рисунке 4 показана та же скважина, что и в предыдущем случае, но продленная глубже на 100 м. Она остановилась на верхнем контакте между более глубокой зоной и вмещающими породами. Аномалии gz и $\Delta g_z/\Delta z$ на каротажных диаграммах указывают, что скважина достигает зоны более плотных пород, но еще не пересекла центра избыточных масс.

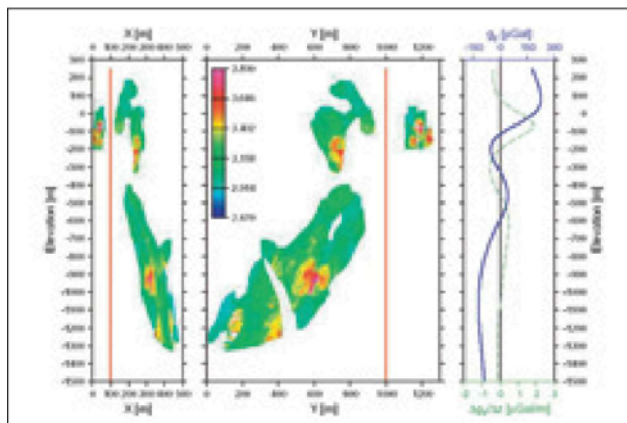


Рисунок 1. Скважина пропустила рудное тело Kelly Lake. Плотностная модель трех зон рудного тела спроектирована на плоскости xz (слева) и yz (посередине) вдоль скважины. Справа приводятся графики рассчитанных по профилю вертикальной компоненты аномалий силы тяжести g_z (сплошная линия) и вертикального градиента $\Delta g_z/\Delta z$ (пунктирная линия). Цветовая шкала показывает распределение плотности в $г/см^3$. Плотность вмещающих пород 2.8 $г/см^3$. Скважинные гравиметрические профили показывают прохождение g_z и пика $\Delta g_z/\Delta z$, относящиеся к избыточным массам, расположенным за пределами скважины, указывая и близповерхностные и глубинную зоны вдали от скважины.

Рудная геофизика

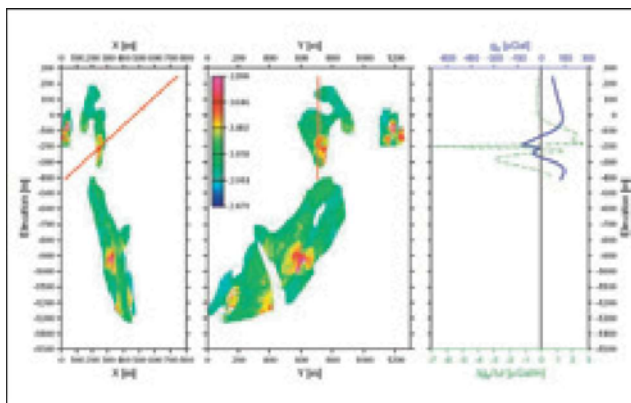


Рисунок 2. Скважина пересекла одну из близповерхностных зон рудного тела Kelly Lake. Панель справа показывает графики рассчитанных по профилю вертикальной компоненты аномалий силы тяжести g_z (сплошная линия) и вертикального градиента $\Delta g_z/\Delta z$ (пунктирная линия). Цветовая шкала показывает распределение плотности в г/см^3 . Плотность вмещающих пород 2.8 г/см^3 . Гравитационный эффект резко проявлен и меняется в области пересечения. Имеется доказательство присутствия глубинной зоны под дном скважины.

Интерпретация скважинных гравиметрических измерений

Моделирование рудного тела Kelly Lake демонстрирует простые приемы общего понимания гравиметрических данных. Глубина и расстояние до массива сульфидного тела, которое не пересекается скважиной, могут быть оценены по положению пиков аномалии и расстоянию между ними. Расстояние между пиками ξ дает возможность оценить максимальное радиальное расстояние от скважины до центра масс, учитывая, что для сферического тела расстояние равно 0.7ξ , а для горизонтального цилиндрического тела 0.5ξ . Избыточная масса может быть оценена по формуле $M=0.1A\xi^2$, где M – избыточная масса в тоннах, A – амплитуда между пиками в $\mu\text{Гал}$ и ξ измерено в метрах. Полная масса, MT равна $M(\rho_b/\rho_{ph})$, где ρ_b – плотность заданного тела и ρ_{ph} – плотность вмещающих пород. Гравитационные аномалии в случае, если массивные тела пересекаются скважиной, более сложные и описываются уравнением Пуассона.

В случае сложных рудных тел с серией высокоплотных зон, таких как Kelly Lake, гравитационная аномалия становится очень трудной для понимания и требуется разделение аномалий. Данные по нескольким скважинам, распределенным около рудного тела, могут разрешить азимутальную неоднозначность и позволить интерпретатору определить положение и геометрию зон. Должны быть включены другие геолого-геофизические данные. Предварительная модель может быть построена или импортирована в формате GoCAD и UBC-GIF и рассчитаны гравитационные эффекты, используя существующее программное обеспечение для моделирования, разработанное Ecole Polytechnique в связи с разработкой скважинного гравиметра Scintrex.

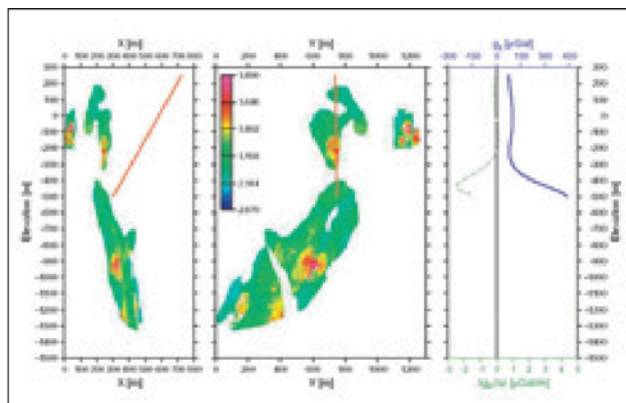


Рисунок 3. Скважина пропустила близповерхностные зоны и не дошла до глубинной зоны. Панель справа показывает графики рассчитанных по профилю вертикальной компоненты аномалий силы тяжести g_z (сплошная линия) и вертикального градиента $\Delta g_z/\Delta z$ (пунктирная линия). Цветовая шкала показывает распределение плотности в г/см^3 . Плотность вмещающих пород 2.8 г/см^3 . Мы наблюдаем слабый эффект, указывающий на избыточные массы (на глубине около 200 м) в близповерхностных зонах в нескольких сотнях метров от скважины. Присутствует четкий гравитационный эффект от глубинной зоны под скважиной.

В следующем проекте поставлены цели создания программного обеспечения для решения обратной задачи по 3D скважинным гравиметрическим данным. На этом этапе мы исследовали различные подходы для преобразования гравиметрических данных при некоторых 3D построениях (Boulanger and Chouteau, 2001; Chasseriau and Chouteau, 2003). Самым перспективным, кажется, может быть стохастический подход, который позволяет задать параметры модели с учетом ковариационной матрицы. Aslı и др. (2000) показали, как по данным рассчитать требуемую матрицу ковариаций. Мы можем распространить стохастическое преобразование на скважинные гравиметрические данные, используя геостатистическую формулу, основанную на кокрингине и ко-симуляции. Этот подход к решению успешно опробован для скважинных радарных данных Gloaguen et al. (2005). Он точно

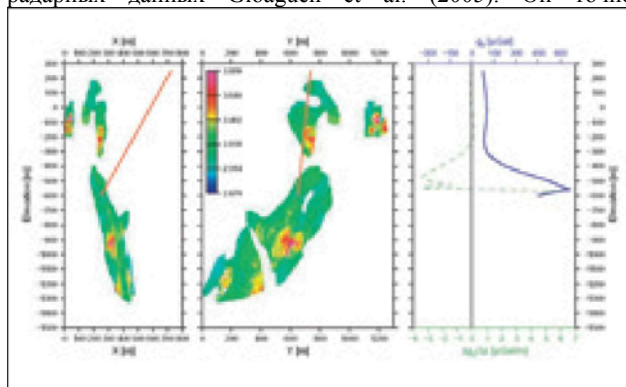


Рисунок 4. Скважина, приведенная на рисунке 3, продлена до кровли глубинной зоны. Панель справа показывает графики рассчитанных по профилю вертикальной компоненты аномалий силы тяжести g_z (сплошная линия) и вертикального градиента $\Delta g_z/\Delta z$ (пунктирная линия). Цветовая шкала показывает распределение плотности в г/см^3 . Плотность вмещающих пород 2.8 г/см^3 . Гравитационный эффект указывает, что скважина быстро достигает зоны повышенной плотности, но еще не достигла центра избыточных масс.

Рудная геофизика

соответствует известным плотностным ограничениям и выдает модели 3D с пространственной структурой, которая более реально отражает изменчивость свойств среды, чем равномерно-ограниченная инверсия.

Выводы

Скважинная гравиметрия предоставляет дополнительную информацию при разработке месторождений полезных ископаемых, как на стадии исследования, так и на стадии разработки. Sintrex разрабатывает скважинный гравиметр, который может быть использован в пробуренных ВQ скважинах и NQ скважинах с буровой установкой до глубин 2000 м. Согласованы операции, требуемые для соответствующей обработки гравиметрических данных, и поправки, которые должны быть тщательно введены, чтобы получить гравитационный эффект с чувствительностью лучше, чем 5 $\mu\text{Гал}$. Ecole Polytechnique разрабатывает программное обеспечение для интерпретации обработанных скважинных гравиметрических данных.

Пример моделирования, базирующийся на плотностной модели рудного тела Inco's Kelly Lake, показывает, что гравиметрические аномалии, полученные по скважинным наблюдениям, могут быть достаточно большими ($>100 \mu\text{Гал}$) для разведки типичных массивов сульфидов, расположенных в 100 м и даже дальше от скважины. Гравитационный эффект и его вертикальный градиент дополняют друг друга: аномалии g_z связаны с отдельными линзами высокоплотных пород с расстоянием между пиками аномалий, грубо определяющим 1.5-кратное расстояние до центра избыточных масс; а аномалия $\Delta g_z / \Delta z$ максимально отображает положение центра избыточных масс против нее. Скважинные гравиметрические данные представляют доказательство существования избыточных масс, расположенных ниже скважины, и на основании этой информации способствуют принятию решения о продолжении скважины на глубину.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Alan King из Inco за предоставление плотностной модели рудного тела Kelly Lake. Разработка скважинного гравиметра для горнодобывающей промышленности поддерживается отраслевой группой Канадского правительства.

Ссылки

Asli, M., Marcotte, D., and Chouteau, M. [2000] Direct inversion of gravity data by cokriging. *Geostat2000*, Cape Town, South Africa.
Boulanger, O. and Chouteau, M. [2001] Constraints in 3D gravity inversion. *Geophysical Prospecting*, 49, 2, 265-280.
Chasseriau, P. and Chouteau, M. [2003] 3D gravity inversion using a model of parameter covariance. *Journal of Applied Geophysics*, 52, 59-74.
Gloaguen, E., Marcotte, D., Chouteau, M., and Perroud, H. [2005] Borehole radar velocity inversion using cokrig-

ing and cosimulation. *Journal of Applied Geophysics*, 57, 242-259.
Herring, A.T. [1990] Introduction to Borehole Gravity. *Edcon*, www.edcon.com.
LaFehr, T.R. [1983] Rock density from borehole gravity surveys: *Geophysics*, 48, 3, 341-356.
Li, X. and Chouteau, M., 1998, Three-dimensional gravity modelling in all space. *Surveys in Geophysics*, 19, 339-368.
Li, X. and Chouteau, M. [1999], On density derived from borehole gravity. *Log Analyst*, 40 1, 33-38.
Popta, J.V., Heywood, J.M.T., Adams, S.J., and Bostock, D.R. [1990] Use of borehole gravity for reservoir characterisation and fluid saturation monitoring. *Society of Petroleum Engineers*, SPE 20896.
Power, M., Belcourt G., and Rockel, E. [2004] Geophysical methods for kimberlite exploration in northern Canada. *The Leading Edge*, 23, 11, 1124-1129.
Seigel, H.O., Hill, H.L., and Baird, J.G. [1968] Discovery case history of the Pyramid ore bodies, Pine Point, Northwest Territories, Canada. *Geophysics*, 33, 4, 645-656.
Singh, B. and Guptasarma, D. [2001] New method for fast computation of gravity and magnetic anomalies from arbitrary polyhedra. *Geophysics*, 66, 2, 521-526.
Smith, N.J. [1950] The case for gravity data from boreholes. *Geophysics*, 15, 4, 605-636.