

## Результаты первых полевых испытаний скважинного гравиметра, предназначенного для использования в горнодобывающей промышленности<sup>1</sup>

Harold O. Siegel<sup>1</sup>, Chris Nind<sup>1,4</sup>, Jeff Macqueen<sup>2</sup>,  
Michel Chouteau<sup>3</sup>, и Bernard Giroux<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Scintrex Ltd; <sup>2</sup>Microlog-Lacoste Inc.; <sup>3</sup>Ecole Polytechnique;  
<sup>4</sup>Email: cnind@scintrexltd.com

### Реферат

Компания Scintrex находится на заключительном этапе создания скважинного гравиметра, предназначенного для использования в горнодобывающей промышленности и в инженерной геологии. Прибор предназначен для проведения каротажных работ внутри бурительных труб NQ на глубине до 2000 м, с использованием стандартного 4-жильного кабеля. Прибор обладает чувствительностью не хуже 5 мкгал, и может применяться в наклонных скважинах с углом 30° относительно вертикали. В рамках этого проекта институт École Polytechnique de Montreal разработал программное обеспечение для решения прямой задачи.

Первое полевое испытание опытного образца зонда было успешно проведено по заказу компании Vale Inco в декабре 2008 года в глубокой скважине, находящейся в поселке Норман в окрестностях г. Садбери, Онтарио. Результаты этого испытания показывают наличие остаточной разнополярной аномалии силы тяжести большой амплитуды, с изломом в том месте, где скважина проходит через колчедан. В настоящее время проводится углубленный анализ данных. Повторный картаж скважины указывает на то, что эксплуатационные характеристики системы GraviLog вплотную приблизились к заданным показателям.

В первой половине 2009 года планируется проведение ряда полевых испытаний по заказу других спонсоров, а во второй половине этого года планируется проведение промышленных исследований.

Гравиметрические измерения в скважинах предоставляют свидетельства изменения плотности как в непосредственной близости от скважины, так и на некотором расстоянии от нее. Разрабатываемый компанией Scintrex скважинный гравиметр впервые даст возможность проводить гравитационный картаж в обычных буровых и инженерно-геологических скважинах

Основное применение системы GraviLog в горнодобывающей промышленности включает в себя обнаружение и оценку массы крупных скоплений колчедана, как пересеченных скважиной, так и находящихся на удалении от скважины; а также точное измерение объемной плотности геологических формаций, пересеченных скважиной.



Chris Nind

### Введение

Компания Scintrex приступила к разработке скважинного гравиметра, пригодного для использования в горнодобывающей промышленности, в сентябре 2005 года. Первое полевое испытание опытного образца скважинного прибора «GraviLog» было проведено в октябре 2008 года, в

скважине неподалеку от г. Линсдей, Онтарио. После этого, в декабре, было проведено успешное полевое испытание прибора в скважине, выбранной компанией Vale Inco в поселке Норман в окрестностях г. Садбери, Онтарио. В течение первой половины 2009 года планируется проведение нескольких полевых испытаний для других промышленных спонсоров проекта.

Скважинная гравиметрия имеет две основные области применения (Siegel и другие, 2007). Во-первых, это эффективный метод исследований для картирования изменений плотности на удалении от скважины, который позволяет производить измерения силы тяжести для обнаружения как протяженных, так и небольших объектов на больших глубинах. Вторая область применения, уникальная для скважинной гравиметрии, заключается в определении объемной плотности геологических формаций, через которые проходит скважина. Это очень важно для контроля качества и для других аспектов горнодобывающей промышленности.

Новая скважинная гравиметрическая система GraviLog от компании Scintrex может быть спущена в скважину малого диаметра (бурительные трубы NQ) на глубину до 2000 метров, при этом угол отклонения скважины от вертикали может составлять до 30°. Конструктивные параметры системы обеспечивают точность, необходимую для определения объемной плотности тонких геологических формаций, и высокую производительность, необходимую для эффективной работы. В Таблице 1 представлены целевые конструктивные характеристики системы. Более полное описание возможностей системы GraviLog применительно к горнодобывающей промышленности можно найти в работе Siegel и другие, 2007.

### История вопроса

Закон всемирного тяготения Ньютона гласит, что между двумя телами массой  $m_1$  и  $m_2$ , чьи центры масс находятся на расстоянии  $r$ , существует взаимное притяжение  $F$ , которое определяется следующим образом:

$$F = Gm_1m_2/r^2 \quad (1)$$

На поверхности Земли, для тела единичной массы выражение (1) упрощается, и принимает следующий вид:

$$g = GM/R^2 \quad (2)$$

<sup>1</sup> Эта статья основана на презентации, которую Chris Nind сделал на 20-й Международной геофизической конференции ASEG, которая проводилась в Аделаиде в феврале 2009 г.

где,

$$G = 6,67 \times 10^{-8} \text{ см}^3/\text{грамм сек}^2$$

$$M = 5,97 \times 10^{27} \text{ грамм}$$

$$R = 6,38 \times 10^8 \text{ см (на экваторе)}$$

Отсюда, на экваторе:  $g = 978 \text{ см/сек}^2$

Общепринятой единицей ускорения, которая используется для измерения небольших изменений силы тяжести, является «микрогал» (мкгал). Она определяется следующим образом:

$$1 \text{ гал} = 1 \text{ см/сек}^2$$

$$1 \text{ мкгал} = 10^{-6} \text{ гал}$$

То есть,  $g \approx 10^9$  мкгал, или иначе, 1 мкгал составляет одну миллиардную часть силы тяжести на поверхности Земли.

Современные наземные гравиметры позволяют измерить ускорение на поверхности земли с точностью порядка микрогал. Несмотря на возможность в полевых условиях, на поверхности Земли или над ней, получать результаты измерений в частях на миллиард, обратноквадратичный

закон уменьшения силы тяжести как функции расстояния до источника является серьезным ограничением при проведении шахтных исследований или нефтепоисковых работ на большой глубине. Компания LaCoste & Romberg разработала скважинный гравиметр более 30 назад, но размеры и функциональные ограничения скважинного зонда делают его применение в горнодобывающей промышленности практически нецелесообразным. Компании Scintrex, при частичной финансовой поддержке группы промышленных спонсоров и правительства Канады, удалось уменьшить размер своего кварцевого датчика и разработать системы автоматического нивелирования, температурного контроля, и электронного управления, поместив их в скважинный зонд малого диаметра, пригодный для буровых скважин. По завершении серии внутривзаводских испытаний опытный образец системы GraviLog был признан годным для проведения своих первых полномасштабных полевых испытаний, которые были проведены для промышленных спонсоров в декабре 2008 года. Один из промышленных спонсоров – компания Vale Inco – обеспечила группе специалистов компании Scintrex по системе GraviLog материально-техническую поддержку и предоставила доступ к подходящей глубокой скважине вблизи г. Садбери, Онтарио.

**Таблица 1. Скважинная гравиметрическая система GraviLog от компании Scintrex, целевые технические характеристики**

	Целевые технические характеристики
Чувствительность	Не хуже 5 мкгал, при величине времени отсчета одна минута
Рабочий диапазон	7000 мгал
Макс. диаметр зонда	48 мм
Макс. длина зонда	Приблизительно 3 м
Макс. рабочая глубина	2000 м (скважина, заполненная водой)
Макс. отклонение ствола скважины от вертикали	60 градусов
Диапазон рабочих температур	от 0°C до +70°C (внутрискважинный участок) от -40°C до +50°C (устье скважины, за исключением ПК)
Определение вертикальности в скважине	+/- 5 см между последовательными пунктами наблюдения (глубина определяется с помощью комбинации датчика давления, датчика положения на лебедке, и инклинометра)



**Рис. 1.** Место проведения испытаний в поселке Норман



**Рис. 3.** Место проведения испытаний в поселке Норман – сбор данных



**Рис. 2.** Место проведения испытаний в поселке Норман – воротник бура

### Место проведения испытаний

Первые полевые испытания скважинного прибора GraviLog проводились в субвертикальной скважине, которую компания Vale Inco выбрала в поселке Норман, вблизи г. Садбери, Онтарио. Место проведения испытаний показано на Рисунке 1.

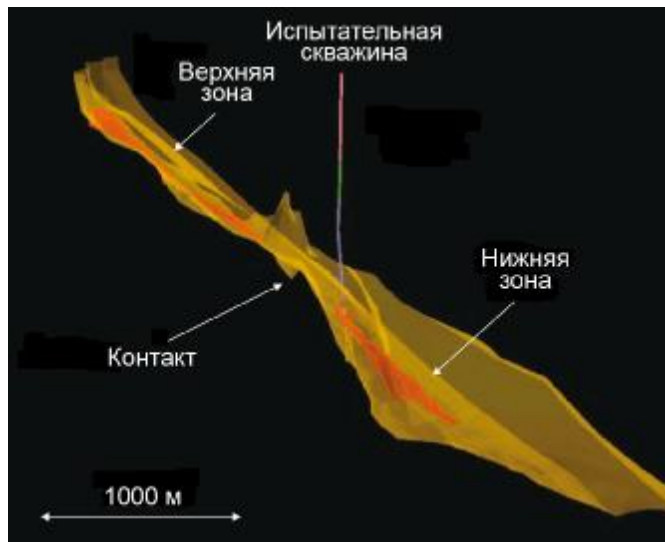
### Испытание скважинного гравиметра с Садбери



**Рис. 5.** Место проведения испытаний в поселке Норман – горизонтальная проекция

Для доставки на место система GraviLog была закреплена стропами на платформе трактора, предоставленного компанией Vale Inco.

### Испытание скважинного гравиметра с Садбери



**Рис. 4.** Место проведения испытаний в поселке Норман – вид на восток

По прибытии к скважине специалисты компании Scintrex поместили скважинный зонд в бурительные трубы NQ и опустили до глубины 1000 м. После чего система была оставлена на ночь для стабилизации (Рисунок 2).

Каротажные работы начались на следующее же утро, и течение двух дней каротаж скважины был произведен в обоих направлениях (Рисунок 3).

Субвертикальная испытательная скважина пересекает «Нижнюю зону» минерализованной области (Рисунки 4 и 5). В интервале глубин от 1000 м до 1400 м на геологической каротажной диаграмме (материалы любезно предоставлены компанией Vale Inco) регистрируются норит, пегматит, и габбро. В интервале глубин от 1400 м до 1800 м на каротажной диаграмме регистрируются гранит, гранитная брекчия, и диабаз.

«На участке глубиной от 1400 м до 1480 м скважина проходит через колчедан. Верхняя половина этого интервала представляет собой очень бедный, рассеянный колчедан с минерализацией в среднем 10-20% (SG = 2,8-3). В нижней половине этого пересечения картина гораздо лучше, она состоит в основном из колчедана, от сплошного до полусплошного, с содержанием более 50% (SG = 3,5-4)» (материалы любезно предоставлены компанией Vale Inco). Это пересечение отображает границу массива колчедана «Нижняя зона» в направлении восстания, которая сама представляет собой большую минерализованную зону с углом падения около 35°. Второй массив «Верхняя зона» лежит на несколько сотен метров вверх по восстанию относительно места пересечения, в этой минерализованной зоне. Бедный, рассеянный колчедан также пересекается скважиной на отметке ниже 1750 м.

Пересечение гравиметрической модели рудного тела Kelly Lake

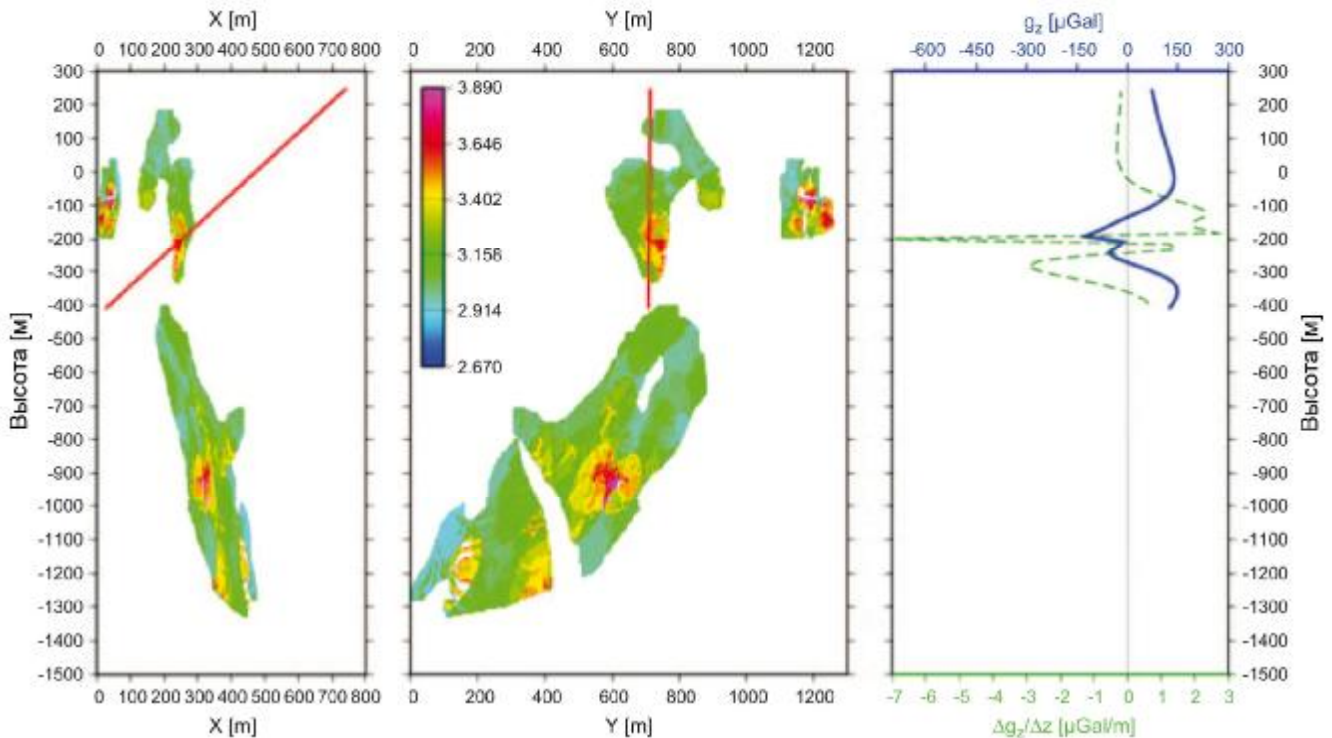


Рис. 6. Модель скважинного гравитационного эффекта в месте пересечения рудного тела Kelly Lake (из работы Seigel и другие, 2007)

Испытание в скважине поселка Норман:  
остаточная сила тяжести

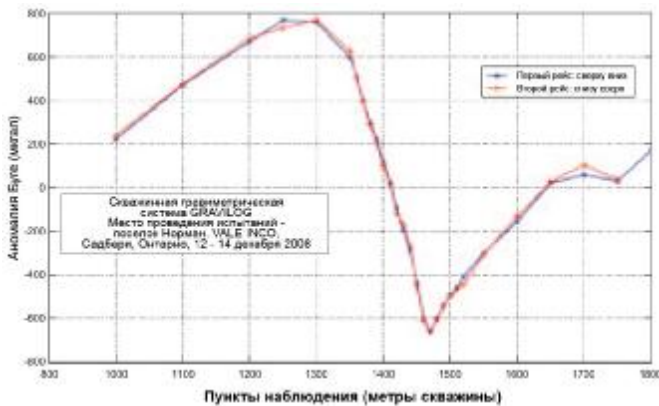


Рис. 7. Место проведения испытаний в поселке Норман – Остаточная сила тяжести по результатам двух рейсов каротажного прибора

Ожидаемый эффект

Ожидаемый скважинный гравитационный эффект рудного тела Cu/Ni в бассейне Садбери был смоделирован в институте Ecole Polytechnique с использованием 3-мерной плотностной модели рудного тела Kelly Lake, разрабатываемого компанией Vale Inco, и гипотетической скважины, пересекающей его верхнюю часть (Рисунок 6). Основной особенностью гравитационного эффекта (голубая линия в правом секторе Рисунок 6) является

скачкообразная и сложная аномалия с изломом, вблизи места пересечения (из работы Seigel и другие, 2007).

Данные скважинной гравиметрии в поселке Норман – предварительные результаты

Для выполнения гравиметрических измерений опытный образец системы Gravilog был спущен в скважину Норман, внутри бурительных труб NQ. Каротаж скважины проводился с 12 по 14 декабря 2008 года, в интервале глубин от 1200 м до 1800 м, при движении скважинного зонда как вверх, так и вниз. Интервалы снятия показаний менялись от 50 м во вмещающей породе до 10 м в зоне минерализации. Измерение глубины осуществлялось с помощью кодового датчика положения на лебедке, установленной на поверхности, и датчика глубины, установленного в зонде. Вода добавлялась в скважину по мере необходимости, для того, чтобы во время каротажа уровень воды был неизменным, и обеспечивалась надежная работа датчика давления. В каждом пункте наблюдения приводился в действие зажим, который фиксировал скважинный зонд на месте. В это время регистрировалось давление, производилось нивелирование гравиметрического датчика, и выполнялись два 60-секундных измерения силы тяжести. После этого зажим освобождал зонд, и он перемещался к следующему пункту наблюдения, при этом контроль глубины осуществлялся с помощью кодового датчика положения на лебедке. В каждом пункте наблюдения вся эта процедура занимала 5 минут, плюс время, необходимое для перемещения между пунктами наблюдения.

На Рисунке 7 представлена остаточная сила тяжести по результатам двух рейсов каротажного прибора, данные которых обрабатывались отдельно. Средняя повторяемость показаний силы тяжести на участке пересечения составляет 6,0 микрогал. Была зарегистрирована разнополярная остаточная аномалия силы тяжести, при этом максимальный градиент, или «излом» был зарегистрирован во время прохождения скважинного зонда через участок пересечения. Удвоенная амплитуда остаточной аномалии составляла порядка 1,5 мгал, ясно указывая на присутствие большой массы высокоплотного колчедана, относящегося к участку пересечения. В настоящее время проводится углубленная обработка и моделирование данных.

### Измерение объемной плотности

Вертикальный градиент силы тяжести в скважине прямо пропорционален объемной плотности горизонтального пласта между двумя точками измерения (Smith, 1951). Эта уникальная особенность силы тяжести, измеренной в скважине, изображена графически на Рисунке 8 (Herring 1990).



Примечание: Определение плотности после удаления нормального градиента Земли (0,30861 мг/м)

**Рис. 8.** Определение объемной плотности с помощью скважинных гравиметрических измерений

После введения в измеренные значения силы тяжести поправки Фаия (вертикальный градиент силы тяжести в воздухе) объемная плотность определяется простым уравнением:

$$\rho = [-1/(4\pi G)] (\Delta g / \Delta z) = -1,193 (\Delta g / \Delta z) \quad (3)$$

где,  $g$  – это измеренная сила тяжести в мгал, а  $z$  – это расстояние по вертикали вниз от поверхности Земли, в сантиметрах.

Обращаем ваше внимание на то, что  $z$  является глубиной по вертикали вниз от поверхности Земли, поэтому член уравнения  $\Delta z$  равен разному между пунктами наблюдения в скважине, умноженному на синус угла наклона участка скважины между пунктами наблюдения. В качестве альтернативы, величину  $\Delta z$  можно получить непосредственно по разнице показаний датчика давления в двух пунктах наблюдения.

Эти последовательные объемные плотности наносятся на каротажную кривую в обычном формате презентации.

Значения объемной плотности в скважине Норман были рассчитаны по данным остаточной силы тяжести с помощью обычного алгоритма, в котором используются значения разности между соседними пунктами наблюдения (Рисунок 9), и запатентованного алгоритма, разработанного доктором Jeff MacQueen из компании Micro-g LaCoste. В этом алгоритме используется полный комплект измеренных разностей силы тяжести (Рисунок 10). На обоих этих рисунках показаны планки погрешностей.

Значения объемной плотности, рассчитанные по данным скважинной гравиметрии, являются характерными для плотности вмещающих пород выше участка пересечения, они увеличиваются от величины 2,77 г/см<sup>3</sup> на глубине 1300 м до величины 2,95 г/см<sup>3</sup> на глубине 1460 м, затем, ниже участка пересечения, быстро уменьшаются. Эти результаты согласуются с комментариями, предоставленными компанией Vale Inco (см. выше).

### Программа испытаний системы GraviLog – следующие этапы

После завершения обработки данных, полученных с помощью системы GraviLog на испытательном участке в поселке Норман, институт Ecole Polytechnique произведет расчет прямых задач, с учетом дополнительных данных, предоставленных компанией Vale Inco. Будет подготовлены материалы об опыте применения, сначала для спонсоров, затем, с их разрешения, для общей презентации.

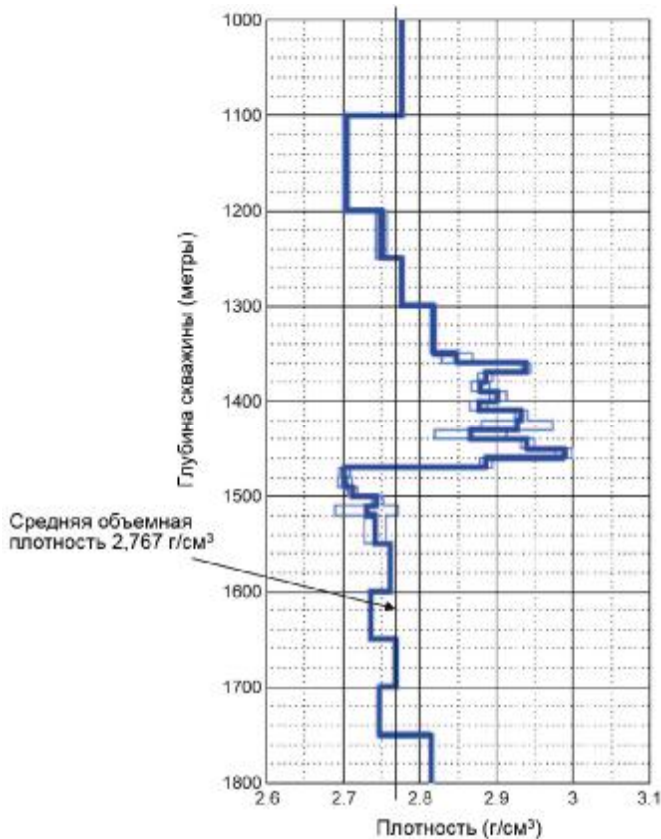
Полевые испытания для трех других промышленных спонсоров, намечены на первую половину 2009 года.

Компания Scintrex создает дополнительные системы GraviLog для скважины в местечке Конкорд. Задача состоит в том, чтобы в течение второй половины 2009 года сделать услуги системы GraviLog коммерчески доступными для горнодобывающей промышленности и в области инженерной геологии.

### Выводы

Скважинный гравиметр GraviLog, разработанный компанией Scintrex для применения в горнодобывающей промышленности, успешно прошел первые полевые испытания для промышленных спонсоров, и продемонстрировал рабочие характеристики, очень близкие к целевым техническим требованиям. Сейчас в компании Scintrex изготавливаются дополнительные скважинные зонды GraviLog, а полевые испытания для других промышленных спонсоров намечены на первую половину 2009 года.

**Inco Norman**  
Плотность по данным скважинной гравиметрии,  
прямая задача



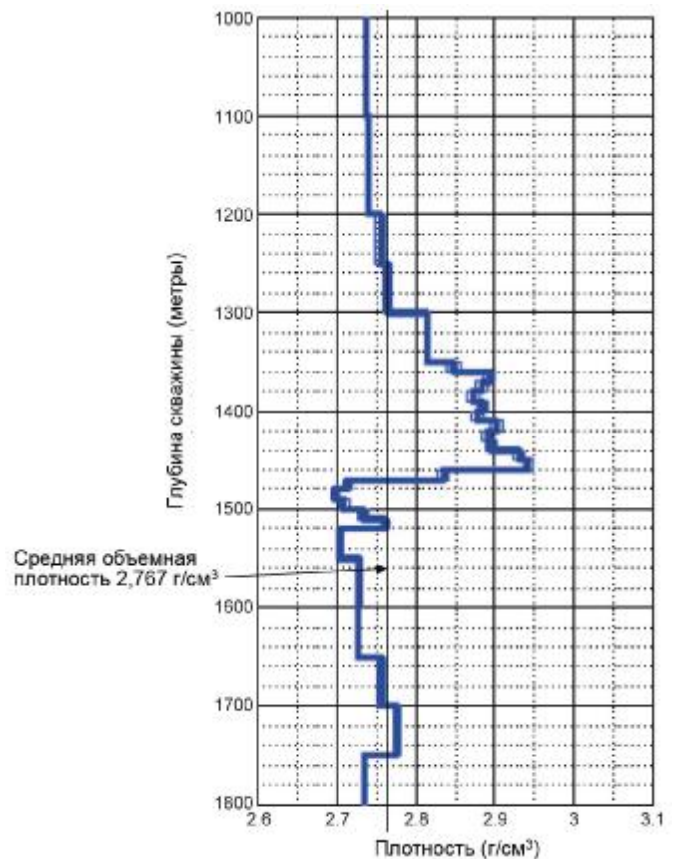
**Рис. 9.** Проект Camiro 05E01, испытательный участок в поселке Норман. Значения объемной плотности получены путем обработки данных, полученных во время первого рейса каротажного прибора, 13 ноября 2008 (сверху вниз), с применением обычного алгоритма для расчета значений объемной плотности

### Признательность

Частичная финансовая поддержка была оказана правительством провинции Онтарио (IRAP, проект № 580123), и четырьмя промышленными спонсорами (BHP Billiton, Vale Inco, AREVA Resources Canada, и Schlumberger) в рамках проекта CAMIRO № 05E01. Остальную часть финансирования взяла на себя компания Scintrex.

Компания Scintrex выражает благодарность компании Vale Inco за прекрасную поддержку, оказанную группе специалистов по системе GraviLog компании Scintrex во время проведения полевых испытаний.

**Inco Norman**  
Плотность по данным скважинной гравиметрии,  
обратная задача



**Рис. 10.** Проект Camiro 05E01, испытательный участок в поселке Норман. Значения объемной плотности получены путем обработки данных, полученных во время обоих рейсов каротажного прибора (сверху вниз и снизу вверх), с применением патентованного алгоритма для расчета значений объемной плотности, который разработал доктор Jeff MacQueen из компании Micro-g LaCoste

### Справочная литература

Herring, A. T., 1990, Introduction to Borehole Gravity (Введение в скважинную гравиметрию): [www.edcon-prj.com](http://www.edcon-prj.com), Edcon, Denver, CO.

Seigel, H. O., Nind, C. J. M., Chouteau, M., и Giroux, B., 2007, Development of a Borehole Gravimeter for Mining Applications (Разработка скважинного гравиметра для применения в горнодобывающей промышленности): EAGE First Break v. 25, July 2007, 71-77.

Smith, N. J., 1950, The case for gravity data from boreholes (Аргументация в пользу гравиметрических данных, получаемых в скважине): Geophysics 15 (4), 605-636.