

Применение высокоточной гравиразведки при обнаружении, оценке и

прогнозировании угроз, связанных с брошенными шахтами

Microgravity as a tool for the detection, characterization and prediction of geohazard posed by abandoned mining cavities

Питер Стайлз (Peter Styles),¹ Сэм Тун (Sam Toon),¹ Эван Томас (Ewan Thomas),² и Марк Скиттралл (Mark Skittrall)³

Введение

Наличие в горном массиве связанных с шахтами и с карстовыми процессами пустот, которые обрушаются или могут обрушиться, является значительной угрозой. Она создает комплекс проблем для нынешних и будущих землепользователей таких территорий. Пустоты препятствуют как эксплуатации объектов, так и рекультивации земель, поскольку вызывают образование воронок на поверхности или зон трещиноватости и ослабленных зон в разрезе, нанося ущерб имуществу, а в катастрофических ситуациях представляют серьезную угрозу жизни. В естественных закарстованных областях наиболее распространены объекты, связанные с выщелачиванием – пустоты, обширные системы пещер, и с обрушением и размывом – карстовые воронки. Искусственные пустоты – горные выработки, штольни и туннели – не менее опасны, а в промышленно развитых районах могут и преобладать над естественными. При изысканиях перед началом эксплуатации (или рекультивации) участка чаще всего проводится бурение скважин по густой сети с целью обнаружения пустот и прослеживания их распространения по площади. Косвенные методы, такие как геофизика, дают экономически эффективный неразрушающий способ прослеживания пустот, при этом бурение не является основным поисковым методом, а используется для заверки результатов.

Наличие пустоты изменяет физические свойства слоев и приводит к возникновению между пустотой и вмещающими слоями контраста свойств, который, при достаточной величине и достаточных размерах объекта, может быть обнаружен соответствующими геофизическими методами. (McDowell, 2002). Высокоточная гравиразведка основана на измерении малых изменений поля силы тяжести и интерпретации этих изменений как проявления изменений плотности в разрезе, связанных, в том числе, с наличием пустот и полостей. Пустоты обычно имеют меньшую, по сравнению с вмещающими породами, плотность и могут быть заполнены водой, осадочными породами, обвальными массами или сочетанием всего этого. Таким образом, наличие пустоты приводит к недостатку масс в разрезе, над которым наблюдается очень небольшое уменьшение силы

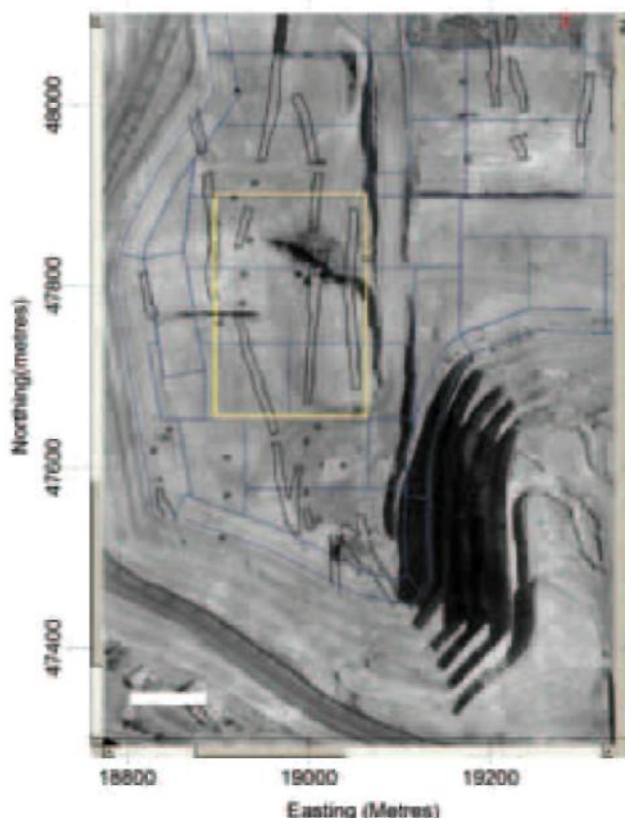


Рис. 1. Аэрофотоснимок территории карьера «Подкова» в Калгурли, Западная Австралия со схемой участков взрывных работ (показано синим) и прогнозным положением горных выработок на глубине 200 м (показано темно-серым). Желтый прямоугольник обозначает участок высокоточной гравиразведки, показанный на рис. 2.

тяжести, которое называют отрицательной аномалией силы тяжести. Хотя основы метода просты, для измерения малых, на уровне 10^{-9} от нормального, изменений поля силы тяжести требуется высокочувствительная аппаратура, строгое соблюдение методики полевых работ и жесткий контроль качества материала, а для интерпретации данных необходим точный расчет поправок и сложные численные процедуры

¹Applied and Environmental Geophysics Group, Keele University, ST5 5BG, UK.

²Geotechnology, Ty Coed, Aberdulais, Neath, SA10 8HE, UK.

³Hyder Consulting, Sir Bruce White House, Suite 12, Kings Court, Newmarket, Suffolk, CB8 7SG, UK.

большие изменения, связанные с высотой над уровнем моря, рельефом местности, приливными явлениями, широтой местности и геологическим строением района, и, как правило, не могут быть обнаружены обычными гравиметрическими работами.

В течение последнего десятилетия высокоточная гравиразведка быстро развивалась благодаря появлению современной высокоточной аппаратуры, методик полевых работ, обеспечивающих высокую точность, новым способам расчета поправок и анализа данных. В работе (Qianshen, 1996) детально рассмотрены основы высокоточной гравиразведки, хотя с тех пор достигнут значительный прогресс, особенно в интерпретации данных. Сейчас



Рис. 2. Вид на участок работ высокоточной гравиразведки с востока. Участок расположен близко к карьерной дороге и к действующим участкам разреза. Положение и размеры участка показаны на рис. 1

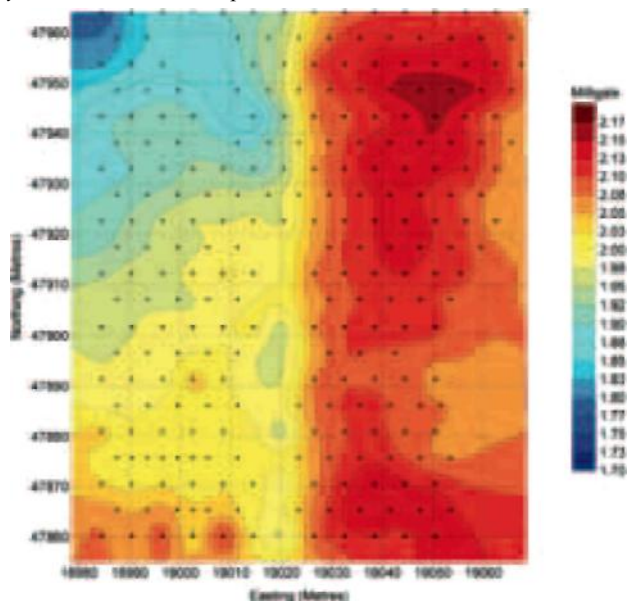


Рис. 3. Карта аномалий силы тяжести в редукции Буге до ввода поправок за рельеф и схема расположения точек наблюдения. Аномалии, связанные с горными выработками, не видны.

возможно выделение и интерпретация аномалий в 10 мкгал с точностью в первые микрогалы. Можно не только обнаружить по отдельным аномалиям шахты, пещеры, естественные и искусственные пустоты, но и установить их глубину, форму и строение. Применение преобразования Эйлера и теоремы Гаусса позволяет устанавливать геометрию пустот и распределение масс в них, что дает сведения, очень важные для выработки способов противодействия угрозам и оценки расходов по засыпке полостей. Целенаправленное проведение повторных наблюдений после проведения защитных мероприятий позволяют оценить степень успеха этих мероприятий установить положение и распределение горных масс, использованных при засыпке.

Благодаря этим качествам, а также тому, что поверхность земли в ходе работ совершенно не нарушается, метод нашел широкое применение в гидрогеологических, инженерных и геотехнических изысканиях. Обычные изыскания, а также лазерное сканирование полостей, применяются в настоящее время для заверки установленного распределения масс. В работах (Emsley et al., 1992) и (Bishop et al., 1997) описано применение высокоточной гравиразведки при поиске как карстовых, так и искусственных пустот, а также использование способов обработки изображений для улучшения локализации аномалий от объектов.

В этой работе рассмотрены два примера применения высокоточной гравиразведки для выявления угроз, связанных с шахтами: первый – на действующем открытом золоторудном карьере в Калгурли (Kalgoorlie), Западная Австралия, второй – на сети старых шахт под Лондоном, из-за которой в 2002 г. произошло обрушение магистрали A2 в центре города. В обоих случаях потребовался тщательный расчет топографических поправок, в первом случае – из-за влияния открытого карьера, во втором – из-за влияния, наряду с рельефом, близлежащих зданий. Методы расчетов были различны, но в обоих случаях эти расчеты были основным шагом, позволившим провести интерпретацию слабых аномалий.

Высокоточная гравиразведка на открытом золоторудном карьере в Западной Австралии

Месторождение Калгурли в Западной Австралии привело к одной из крупных золотых лихорадок XX в. На ранних стадиях добычи велась разработка крутопадающих золоторудных жил штреками с поверхности, что привело к образованию субвертикальных пустот. В настоящее время разработку месторождения ведет компания Kalgoorlie Consolidated Gold Mines (KCGM), которая намерена объединить все старые выработки Калгурли в один суперкарьер Фимистон (Fimiston Superpit) с проектной глубиной 500 м. В настоящее время размеры карьера составляют 1.8 x 0.8 км, а глубина достигает 270 м от поверхности. Карьер врезается в горный массив, пройденный на большую глубину серией штреков, к настоящему времени брошенных. Компания KCGM

располагает цифровой моделью выработок, составленной в пакете Vulcan на основе (плохо сохранившихся) планов закрытия выработок, но в ходе работ постоянно натывается на пустоты с непредсказуемыми геометрией и составом заполняющего материала, прогноз которых затруднен. Используя сверхтяжелую технику – 400-тонные карьерные самосвалы Komatsu – на этих непредсказуемых пустотах, компания несет большие затраты на страхование рисков угрозы здоровью и безопасности, и поэтому решила внедрить методы обнаружения пустот. Широкая программа бурения, проведенная после нескольких крупных обвалов, не дала результатов, позволяющих прогнозировать наличие пустот с требуемой надежностью. Тогда были проведены сначала опытно-методические, а затем и производственные работы методом высокоточной гравиразведки для решения четырех основных задач: (i) определение положения крутопадающих пустот; (ii) выделение пустых и засыпанных полостей; (iii) установление глубины полостей; (iv) определение формы и объема пустых и засыпанных полостей.

Опытно-методические работы проведены на участке дна карьера размером 155 x 85 м, на котором ранее произошло обрушение. В непосредственной близости от участка находится стенка карьера высотой 250 м с крутизной откоса 70°. В уступе видны несколько входов в штреки, а по результатам интерпретации оказывается, что под поверхностью есть несколько субмеридиональных штреков.

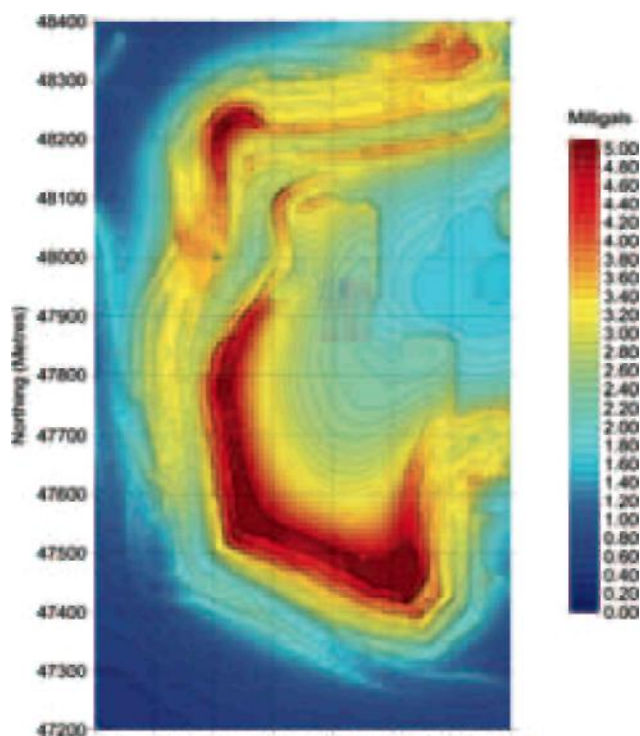


Рис. 4. Карта поправок за рельеф, рассчитанных по цифровой модели местности, и положение участка высокоточной гравиразведки (шкала значений силы тяжести отличается от рис. 3).

Хотя величина поправки за рельеф превышала 7 мгал, на карте остаточного поля выделяются отрицательные аномалии амплитудой менее 100 мкгал, согласующиеся с имеющейся у компании моделью в пакете Vulcan. Последующие земляные работы подтвердили наличие отсутствующих на планах выработок объектов, выделенных с помощью высокоточной гравиразведки. Опытно-методические работы показали пригодность метода для обнаружения со дна карьера заполненных и открытых пустот на глубинах до 20-30 м под ним. Качество данных ограничивается огромными изменениями эффектов рельефа, достигающими 35 мкгал/м, забивающими сами аномалии. Для учета рельефа авторами разработана программа быстрого расчета топографических поправок, которая позволяет вычлнить слабые эффекты пустот и засыпанных выработок.

На втором этапе работы выполнены на участке с неизвестным строением, расположенным в нескольких сотнях метров от основной производственной площадки, с целью проверить работоспособность метода в производственной обстановке. Тщательное следование методики работ позволило получить качественные данные, по которым выявлено наличие ряда открытых и частично засыпанных выработок, которые были заверены бурением и земляными работами.

Работы проводились в центре действующего карьера «Подкова» (Horseshoe) на отметке –200 м (рис. 1). Поверхность участка (утрамбованное дно карьера) в целом плоская, хотя и с неровностями, позволяет нормально установить гравиметр. К северу, западу и югу от участка дно карьера также плоское, с востока участок ограничен насыпью грунтовой дороги. Во время работ на

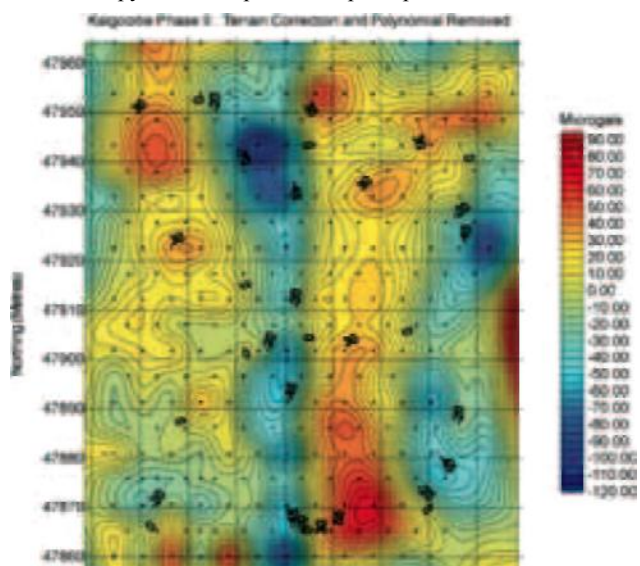


Рис. 5. Карта остаточных аномалий силы тяжести после ввода поправок за рельеф и вычитания региональной составляющей в виде поверхности 3-го порядка. Видны линейные и дугообразные отрицательные аномалии силы тяжести, связанные с брошенными горными выработками.

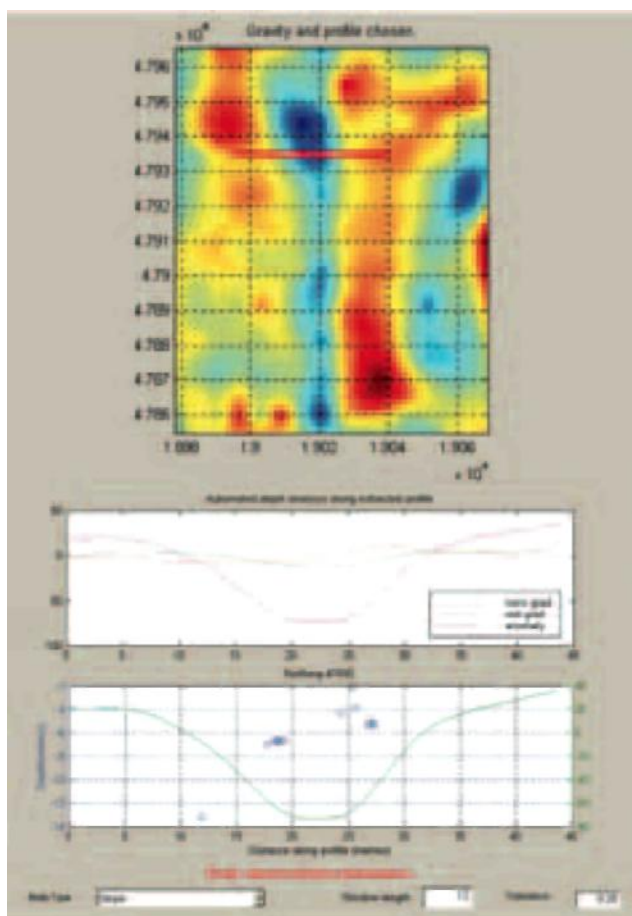


Рис. 6. Результаты деконволюции по Эйлеру на профиле, показанном на карте в верхней части рисунка. Выделяется две группы источников на глубинах 5.5 – 6.5 м.

площадках восточнее дороги и в 100 м к югу продолжалась добыча. На площадке, непосредственно примыкающей к площади работ с юго-запада, во время геофизических работ велись буровзрывные работы. На протяжении всего времени по дороге продолжалось движение. Фотография участка показана на рис. 2 (желтым даны контуры участка). По окончании работ дорожная насыпь была срыта. Участок находился в середине карьера на расстоянии не менее 20 м от его стенок.

Методика полевых работ

Опытнo-методические работы проводились по густой равноугольной сети с избыточным количеством измерений, что обеспечило максимально возможную точность. Повторными наблюдениями установлено, что расстояние между точками рядовой сети 6 м является оптимальным по производительности и детальности. Опорные точки располагались на двух заметных поднятиях рельефа в пределах участка. При работах использована местная система координат, привязанная путем обычной топографической съемки, результаты которой применялись для проверки работы самоустанавливающегося лазерного нивелира, настройка которого проводилась в начале каждого рабочего дня. Высотные отметки (превышения) пунктов

наблюдения проводились оператором гравиметра с помощью лазерного нивелира. При работах использовался гравиметр Scintrex CG3M. Гравиметр выносился на участок после стабилизации, измерения выполнялись по высокоточному протоколу со снятием 120 отсчетов длительностью 1 с каждый. Работы в условиях сильных помех требуют тщательного контроля за уровнем шумов по описанной ниже процедуре.

Снижение уровня промышленных шумов

Высокоточная гравиметрическая съемка велась в сложных условиях высокого уровня шумов в действующем карьере без остановки горных работ. После запуска гравиметра перед началом измерений проводилась оценка уровня вибраций в карьере. Для оценки уровня сейсмических шумов связанных с горными работами в карьере и выбора эффективных способов борьбы с ними выполнен ряд измерений по различным методикам. В аппаратуре предусмотрена возможность фильтрации сейсмических шумов или отбраковки отсчетов с качеством ниже заданного уровня (выборочная регистрация). При отключенных фильтрации и отбраковке качество данных получается низким, стандартное отклонение по 120 отсчетам достигает 192 мкгал. Однако шум не был постоянным и отмечался лишь в короткие интервалы времени, достигая максимума при прохождении самосвалов по примыкающей насыпи в непосредственной близости от гравиметра ниже последнего. В остальное время шумы карьера имели ограниченное влияние, стандартное отклонение по 120 отсчетам достигает 60 мкгал. Точность съемки по контрольным измерениям всегда была на уровне 7 мкгал, что связывается с длительным (120 отсчетов) накоплением. Испытания показали, что подавление шумов нужно лишь в короткие промежутки времени, при прохождении самосвалов по насыпи вблизи прибора. Буровые работы (приводившие к высокочастотным вибрациям), шедшие поблизости, не вносили заметного вклада в общий уровень шумов. Затем было проведено сравнение результатов при включенной фильтрации сейсмических шумов и при выборочной регистрации без фильтрации.

Фильтрация сейсмических шумов оказалась неэффективной и не повышала качества данных, что связано частотным диапазоном фильтра, рассчитанного на подавление шумов частоты более низкой, чем у помех в карьере. Выборочная же регистрация оказалась как эффективной, так и легко реализуемой, и кратковременные помехи практически не влияли на производительность гравиметрических работ. По результатам испытаний принято решение о проведении работ с выборочной регистрацией, что обеспечило высокую производительность на уровне 140 точек в день (12 точек в час) в дневное время и 10 точек в час в ночное при хорошем качестве данных. Точность съемки по результатам 54 контрольных наблюдений составила 4.7 мкгал на опорных и 5.7 мкгал на рядовых точках, что является отличным результатом при любых работах, а особенно в таких сложных условиях.

first break том 24, май 2006

Качество данных тщательно оценивалось, результаты измерений с неудовлетворительным качеством отбраковывались. Карта аномалий силы тяжести в редукции Буге показана на рис. 3. В поле наблюдается градиент в широтном направлении, выраженных аномалий не наблюдается, присутствует резкая линейная структура по линии $X=19025$, которая представляется весьма важной; поле в значительной степени определяется эффектом стенок карьера. По данным детальной фотограмметрии, проведенной в ходе обычных работ по оценке запасов, были построены цифровые модели местности для карьеров «Главный» (Main) и «Офис» (Office), по которым затем, по алгоритму с использованием быстрого преобразования Фурье (Parker, 1995) были рассчитаны поправки за рельеф (рис. 4). Значения поправок очень велики, достигают 5 мгал на самых крутых склонах стенок карьера, но как видно на карте, в пределах участка работ образуют довольно простую поверхность. Из аномалий в редукции Буге были вычтены поправки за рельеф и региональная составляющая в форме поверхности третьего порядка. На карте остаточных аномалий силы тяжести (рис. 5) ясно видны несколько отрицательных аномалий. Самая крупная, амплитудой до -120 мгал, отмечается на линии $X=19020$, ее ширина и амплитуда увеличиваются к северу от линии $Y=47920$. Вторая, изогнутая, аномалия находится в восточной части участка, рядом с менее заметной широтной аномалией на линии $Y=47870$. В северо-западном углу участка отмечается окончание отрицательной аномалии, но к данным на краях карты следует относиться с осторожностью.

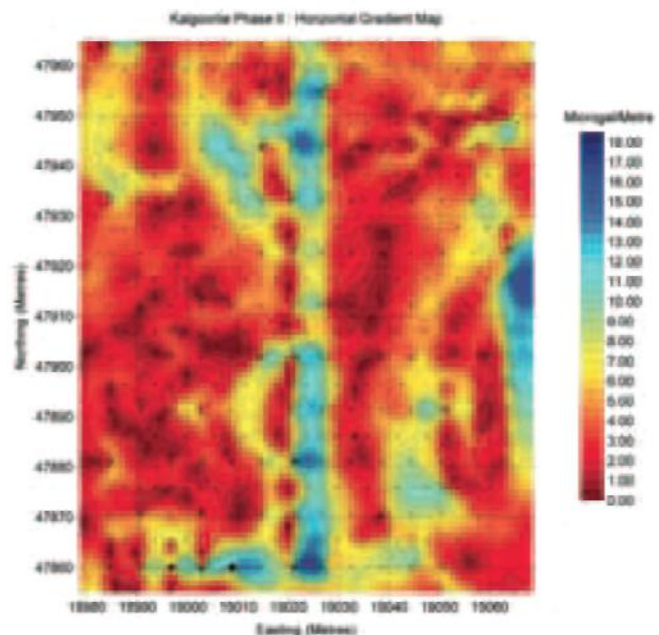


Рис. 7. Карта лапласиана остаточных аномалий силы тяжести. Видна яркая аномалия, соответствующая Y-образному разветвлению горной выработки.

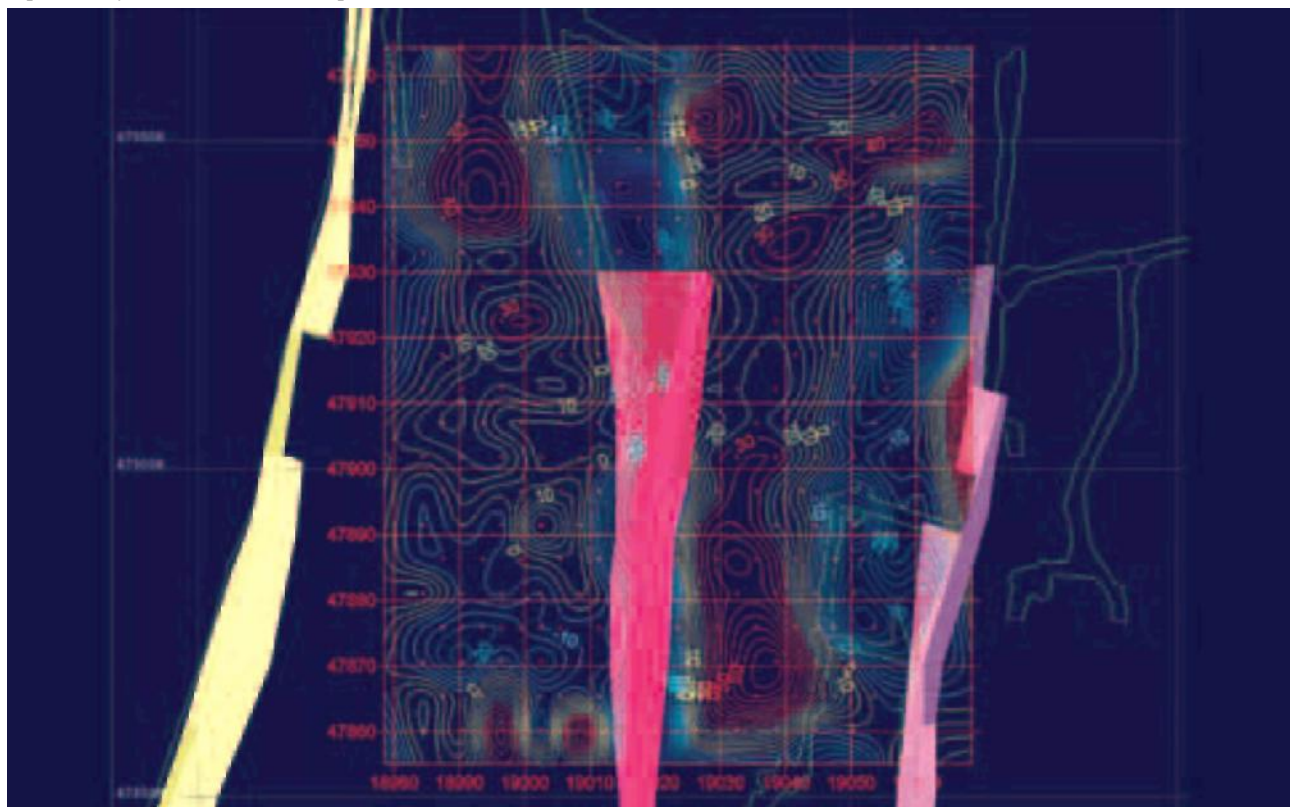


Рис. 8. План расположения горных выработок на глубине 200 м (пакет Vulcan), совмещенный с картой остаточных аномалий силы тяжести. Отмечается хорошее соответствие областей расширения аномалии силы тяжести и разветвления горных выработок.

Автоматический анализ глубин с помощью деконволюции по Эйлеру

Положение тел, создающих малые аномалии силы тяжести, можно установить с помощью операции, называемой деконволюцией по Эйлеру (Thompson, 1982, Murdie et al., 1999) – метода локализации источников потенциальных полей, использующего как значения полей и их градиентов, так и оценки возможной геометрии аномалеобразующего тела. Выражения для амплитуд потенциальных полей (поле тяжести, магнитное поле) и их пространственных производных являются решениями уравнения Лапласа, а также уравнения однородности Эйлера порядка n , где n называют структурным индексом.

$$(x - x_o) \frac{\partial V}{\partial x} + (y - y_o) \frac{\partial V}{\partial y} + (z - z_o) \frac{\partial V}{\partial z} = -nV$$

Производная непрерывного поля V удовлетворяет тому же уравнению однородности степени n где структурный индекс n , характеризующий скорость убывания поля с расстоянием r , зависит от формы предполагаемого тела (линия, точка, сфера или любое их сочетание) и типа конкретного потенциального поля. Таким образом, если пространственные производные поля, измеренного в точке (x, y, z) , могут быть измерены или вычислены более чем в четырех точках, и если возможно оценить величину n , систему уравнений можно решить относительно координат аномалеобразующего тела (x_o, y_o, z_o) путем обращения матрицы по методу наименьших квадратов. В нашем случае в качестве величины V используется измеренная остаточная аномалия поля силы тяжести, а решение (оценка положения аномалеобразующего тела) ищется в окне шириной 10-15 точек, которое движется по профилю. Далее на рисунках положения решений показаны кружками. Каждая точка соответствует одному решению; местам, где решения группируются, приписывается большая достоверность.

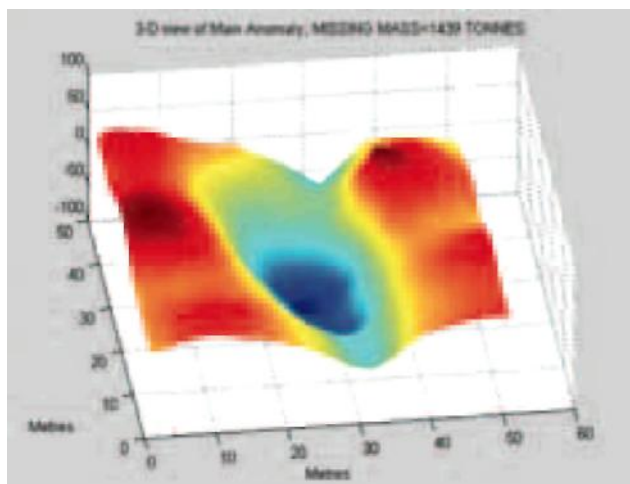


Рис. 9. Дефицит масс (около 1400 т), соответствующий аномалии от разветвления выработок и теоретическая аномалия силы тяжести, рассчитанная для него по теореме Гаусса.

На рис. 6 показан профиль по линии $Y=47935$ с соответствующими результатами деконволюции по Эйлеру. Решение состоит из двух четко разделяемых объектов, которым соответствуют хорошо локализованные группы точек: более глубокого объекта (6.5 м) в западной части профиля и менее глубокого (5.5 м) – в восточной части.

К остаточному полю силы тяжести на карьере «Главный» применен также фильтр второго порядка для выделения граней (оператор Лапласа), который оказался эффективным средством оконтуривания выработок. Результаты показаны на рис. 7. На линии $Y=47920$ видна четкая Y -образная аномалия, что подтверждает результаты деконволюции по Эйлеру. На рис. 8 представлена карта выработок из пакета Vulcan, совмещенная с картой аномалий поля силы тяжести; отчетливо видно хорошее соответствие положения разветвляющихся выработок положению аномалий на карте лапласиана. Еще одна выработка в восточной части участка соответствует отмечаемой там же отрицательной аномалии в остаточном поле силы тяжести. Известно, что в точке $X=19051, Y=47892$ имеется небольшая выработка, наличие которой подтверждено бурением.

Оценки распределения масс

Важную информацию о подработанной территории несут количественные оценки масс вещества, вынесенного из-под участка (дефицит масс). Последний может быть связан как с наличием отдельных полостей, так и с высокой пористостью в протяженных разуплотненных зонах. Дефицит масс является полезным показателем общей пустотности разреза; авторы вычисляли его для оценки количества грунта, необходимого для засыпки полостей. Дефицит масс, создающий отрицательные аномалии поля силы тяжести может быть вычислен по значениям аномалий с применением теоремы Гаусса без привлечения априорной информации о расположении объектов и их природе.

Этот метод особенно полезен при оценке общего количества материала, требуемого для засыпки пустот при любых работах по рекультивации, а повторные измерения после рекультивации позволяют установить эффективность принятых мер по исчезновению аномалии. Оценка дефицита масс в районе разветвления выработок по результатам высокоточной гравиразведки составила 1400 т (рис. 9). Объем материала, требуемого для засыпки, зависит от его плотности; при оценке избыточной плотности в 1000 кг/м^3 он составит около 1400 м^3 . В горном деле эти расчеты можно использовать при оценке возможных потерь в добыче, связанных с наличием пустот, что позволит точнее оценить экономическую выгоду.

Применение метода на открытых карьерах

Высокоточная гравиразведка применима для обнаружения и прослеживания в разрезе старых горных выработок под дном карьера в условиях высокого уровня шумов без остановки добычи; результаты соответствуют моделям пакета Vulcan. Точный расчет поправок за рельеф по густой



Рис. 10. Просадки грунта, вызванные обвалом средневековых шахт под магистралью A2 в Блэкхите, Лондон (вид с востока).

сети проводится по результатам фотограмметрии карьера по стандартным, хотя и длительным процедурам. Выделение разветвлений выработок показывает степень разрешения, которой можно достичь, применяя должным образом деконволюцию по Эйлеру и оператор Лапласа. По карте аномалий можно оценить дефицит масс, что полезно при анализе степени выноса материала из разреза, позволяя повысить как экономическую эффективность, так и безопасность труда и сохранность оборудования.

Провал в Лондоне из-за обрушения меловых шахт.

На протяжении 4000 лет из штолен в районе Граймз-Гревз (Grimes Graves) у пос. Тетфорд (Thetford), графство Норфолк, Великобритания, (возможно, древнейшее на острове место добычи кремня) на поверхность выносились большие массы мела. В римское и саксонское время добываемый там кремень использовался в строительстве, а позднее стали использовать и сам мел: пережигать его в известь, которая шла на строительный раствор и раскисление почв, а также на обеззараживание тел погибших при эпидемиях, свирепствовавших в Британии с 1348 по 1666 г. Во многих местах графств Кент и Сассекс встречаются древние горные выработки («dene-holes», «вход в пещеру» – термин местных краеведов – *Прим. перев.*),

представляющие собой небольшие меловые шахты с вертикальным стволом. В ряде крупных городов, в частности, в Норвиче (Norwich), в Рединге (Reading) и в районах Блэкхит (Blackheath) и Льюсхэм (Lewisham) на юго-востоке Лондона, древними шахтами подработаны значительные площади.

7 апреля 2002 г. на магистрали A2 (древняя римская дорога Дувр – Лондон), там где она поднимается на холм Блэкхит (юго-восточная часть Лондона), произошел крупный провал грунта, приведший к образованию двух воронок вблизи сочленения холмов Блэкхит и Мэйдентоун (Maidenstone). Большая из них, диаметром около 9 м и глубиной около 3 м, находилась в переулке, ведущем на восток от холма Блэкхит, прямо напротив холма Мэйдентоун. Вторая воронка, диаметром около 2 м, появилась немного выше по склону, на тротуаре в зоне частной малоэтажной застройки, причем проседание продолжалось, что было заметно по растрескиванию покрытия проезжей части и тротуаров. 6 мая 2002 г. напротив зоны застройки восточнее двух первых образовалась третья воронка размером около 1.6 x 3.2 м и глубиной около 2 м. Обрушение произошло в результате размыва грунта, уносившегося в меловые шахты, датируемые серединой XV – серединой XIX вв. (а возможно, и римским временем).

Первые документальные свидетельства о добыче мела на холме Блэкхит содержатся в документах местных властей за 1590 г. (Acts of the Privy Council, 1590, Vol. xix, p. 355), где речь идет об использовании печей для обжига извести: «арендатор, которому сказано было, что когда королева пребывает в своей резиденции в Гринвиче, работать ему не следует, потому что печь сильно дымит, обратился, ради компенсации убытков от этого запрета, к местным властям с прошением о снижении арендной платы». Холм Блэкхит является ближайшим к Лондону месторождением мела; для восстановления Лондона после Большого пожара 1666 г. мел требовался в огромных количествах, и существовало предписание «всячески поощрять к добыванию мела всеми возможными способами». Это было связано с новыми правилами строительства, которые требовали строить из кирпича с известковым раствором, а не из дерева (*The Transactions of the Greenwich Antiquarian Society 1905-1907*).

Провалы 2002 г. на много месяцев нарушили движение, значительное число людей пришлось эвакуировать; изыскания и восстановительные работы продолжались 10 месяцев и обошлись в несколько миллионов фунтов стерлингов. По оси магистрали и на прилегающих участках были выполнены большие объемы (2660 точек с шагом 3 м) высокоточной гравirazведки (рис. 10).

Поправки за рельеф с учетом высоких зданий нельзя было рассчитать ни по каким, самым хитроумным, стандартным программам, поскольку склоны (стены) были отвесными, и методы Фурье, применявшиеся в Калгурли, не обеспечивали требуемого высокого разрешения. В этой ситуации пришлось искать аналитическое решение.

Сила, действующая на точечную массу m , расположенную в точке $(a,0,0)$, со стороны прямоугольного параллелепипеда с ребрами $2a \times 2b \times 2b$ выражается как:

$$F = \frac{GMm}{ab^2} \int_{-b}^b dz \int_{-b}^b dy \int_{-a}^a \frac{a-x}{[(a-x)^2 + y^2 + z^2]^{3/2}} dx =$$

$$= \frac{4GMm}{ab^2} \left\{ aj + 2b \ln \left[\frac{(\sqrt{2}+1)(\sqrt{\frac{4a^2}{b^2}-1})}{(\sqrt{\frac{4a^2}{b^2}+1})} \right] - 4a \sin^{-1} \left(\frac{a\sqrt{2}}{b\sqrt{\frac{4a^2}{b^2}+1}} \right) \right\}$$

Основанный на этом выражении алгоритм вычисляет эффекты СТЕН, которые затем собираются в ЗДАНИЯ, которые, в свою очередь можно, поворачивая, группировать и рассчитывать гравитационный эффект ГОРОДА. Процедуру можно повторять по мере необходимости.

На рис. 11 показана карта поправок за рельеф для мест провалов в Гринвиче и прилегающих территорий. После внесения этих поправок в наблюдаемые значения силы тяжести была построена карта остаточных аномалий силы тяжести (рис. 12). После ввода поправок за влияния нескольких малоэтажных зданий на карте стали видны места, где в прошлом велась добыча мела, которые находились прямо у края дороги. Видны также участки дороги, проходящие по ненарушенному грунту. На карте

видно, что римская дорога в основном (красные и желтые участки) не подвержена влиянию горных выработок. Напротив, на участках в районе линий $Y=900-950$, обширные синие участки соответствуют отрицательным аномалиям, связанным с горными выработками рядом с дорогой и под ней, где и произошло обрушение.

На линии $Y=850$ видна четкая поперечная аномалия, пересекающая дорогу; аномалия соответствует старому железнодорожному тоннелю, о котором до начал работ не было известно, и уверенное обнаружение которого подтвердило эффективность работ. Провал бурового инструмента в более чем 150 скважинах заверил результаты гравirazведки, точно указавшей места дефицита масс.

К настоящему времени подобные работы проведены или ведутся в Норвиче, графство Норфолк, и в Хэтфилде, графство Гертфордшир, где во многих местах имеются старые меловые шахты и карьеры, с которыми связан ряд обвалов, произошедших в XX в.

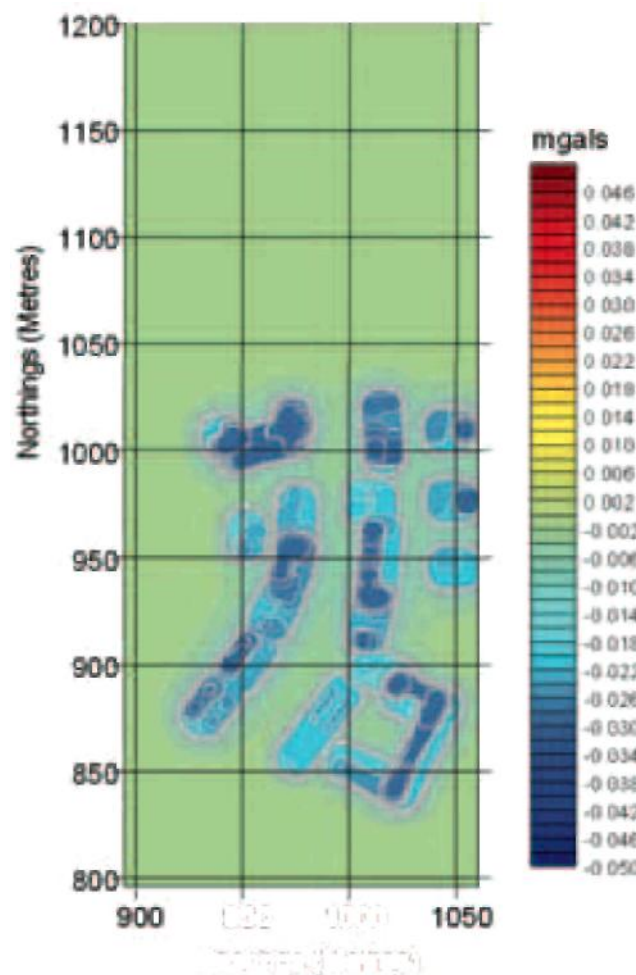


Рис. 11. Карта поправок за рельеф с учетом эффекта близлежащих высоких зданий.

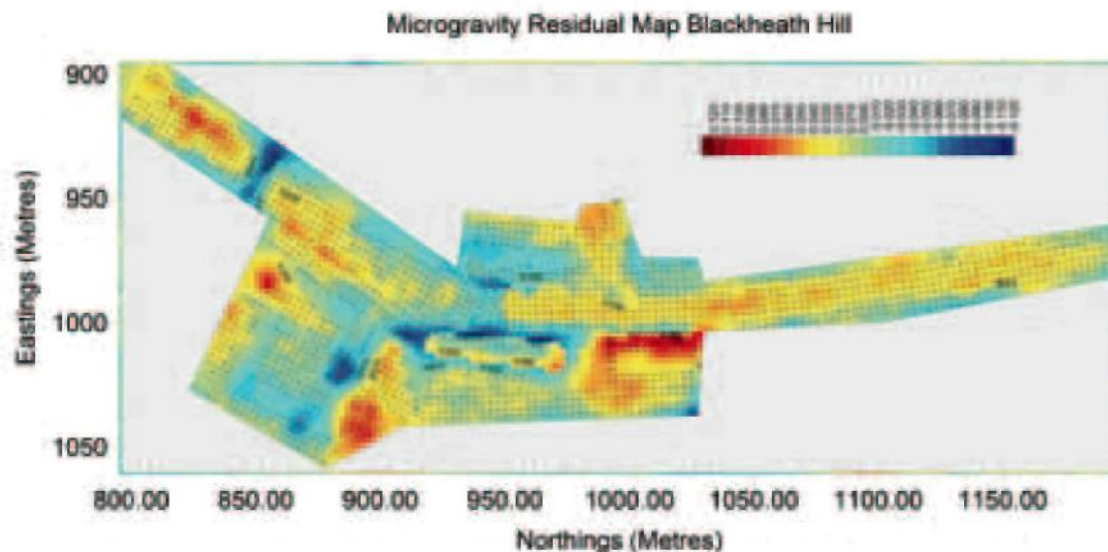


Рис. 12. Карта остаточных аномалий силы тяжести участка римской дороги (магистраль A2) на Лондон. Видно положение мест добычи мела после эпидемии чумы XV в., часть из которых недавно обрушилась. Карта повернута на 90° относительно карты поправок за рельеф.

Дальнейшее развитие высокоточной гравиразведки

Установление причин обвала (т. е. выявление пустот или зон размыва) является лишь первой целью программы оценки состояния участка. Оценка устойчивости и степени возможной угрозы, связанной со смещением поверхности и возможным обрушением, – неотъемлемая часть процесса восстановления. Для обнаружения контрастов плотности в разрезе и слежения за их изменением во времени можно применять высокоточный гравиметрический мониторинг. Такой мониторинг проводится быстро, в реальном времени, с небольшими затратами и практически без воздействия на окружающую среду и население. Несмотря на успехи высокоточной гравиразведки за последние 10 лет, гравиметрический мониторинг пока остается новинкой, хотя несколько примеров уже опубликовано.

Повторная высокоточная гравиметрическая съемка применялась (Poeter, 1990) для выявления неоднородностей строения в пределах понижения уровня подземных вод при откачке из неизолированного водоносного горизонта. Высокоточный гравиметрический мониторинг применялся также (Pool and Eychaner, 1995) при изучении движения подземных вод. В этом случае гравиразведка использовалась для прямых оценок водонасыщенности водоносного пласта и оценки возможного расхода. Имеется решение прямой и обратной задачи мониторинга (Hare et al., 1999) полученное при изучении возможностей метода по контролю нагнетания воды на месторождении Прадхо Бэй (Prudhoe Bay) на Аляске. Тем не менее, до недавнего времени (Rybakov et al., 2001) высокоточный гравиметрический мониторинг не применялся для обнаружения зон разуплотнения и их дальнейшего контроля в нестабильной обстановке. Впервые в этих условиях метод

применен для слежения за развитием карстовых воронок на западном берегу Мертвого моря (Rybakov et al., 2001). Усовершенствования в метод, в том числе в его 4D вариант, внесены Группой прикладной и экологической геофизики Университета г Киле (Applied and Environmental Geophysics Group, Keele University) и рядом других авторов: (Branston and Styles 2003, Styles 2003, 2004, Styles et al., 2005). В самое недавнее время метод успешно применен для контроля за объемом газа в выведенных из эксплуатации подземных газохранилищах в Великобритании и Франции (Bate, 2005; Bate and Styles, 2006, в печати). Это, очевидно, расширяет область применения метода при долгосрочном мониторинге содержания углекислого газа в качестве альтернативы дорогостоящей 4D сейсморазведке.

Возможности высокоточной гравиразведки при неразрушающих поисках естественных (карстовых) и искусственных (горные выработки) полостей весьма велики, а при использовании в 4D варианте этот метод позволяет следить за развитием полостей, находящихся в неустойчивом состоянии.

References

- Bate, D. [2005] 4D reservoir volumetrics: a case study over the Izaute gas storage facility. *First Break*, **23**, 69-71.
- Bate, D. and Styles P. [2006] Time-lapse microgravity for monitoring hydrocarbon reservoir behavior during injection and recovery operations. In: *Underground Gas Storage*, Geological Society of London Special Publication, (in press).
- Bishop, I., Styles, P., Emsley, S. J., and Ferguson, N. S. [1997] The detection of cavities using the microgravity method. In: *Modern Geophysics in Engineering Geology*, Geological Society of London Engineering Geology Special Publication. SPE12, 155-168, Geological Society Publishing House, Bath.
- Branston M.W. and Styles P. [2003] *The application of time-*

- lapse microgravity for the investigation and monitoring of mining subsidence. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 36, 231-244.
- Emsley, S. J., Summers, J. W. and Styles, P. [1992] The detection of sub-surface mining related cavities using the microgravity technique. *Construction over Mined Areas*, Conference Proceedings, 27-35, Pretoria, South Africa.
- Hare, J. L., Ferguson, J. F., Aiken, C.L.V., and Brady, J. L. [1999] The 4-D microgravity method for waterflood surveillance: A model study for the Prudhoe Bay reservoir, Alaska. *Geophysics*, 64, 78-87.
- McDowell, P. W. [2002]. In: *Geophysics in Engineering Investigations*, Geological Society of London Engineering Geology Special Publication with CIRIA. SPE19, Geological Society Publishing House, Bath.
- Murdie, R. E., Styles, P., Upton, P., and Cassidy, N.J. [1999] The use of Euler Deconvolution for the determination of the depth to Archaeological Features. In: Pollard, A.M. (Ed.), *Geoarchaeology, Exploration, Environment, Resources*, 41-61. Geological Society of London Special Publication, SP165, Geological Society Publishing House, Bath.
- Parker, R.L. [1995] Improved Fourier terrain correction, Part I. *Geophysics*, 60, 1007-1017.
- Poeter, E. P. [1990] A new tool: delineation of textural heterogeneities in unconfined aquifers, using microgravity surveys during pumping. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 27(3), 315-325.
- Pool, D.R. and Eychaner, J.H. [1995] Measurements of aquifer-storage change and specific yield using gravity surveys. *Ground Water*, 33(3), p. 425-432.
- Qianshen, W. [1996] Microgravimetry, ISBN: 90-6764-222-3 VSP Science, 158 p.
- Rybakov, M., Goldshmidt, V., Fleischer, L., and Rotstein, Y. [2001] Cave detection and 4-D monitoring: A microgravity case history near the Dead Sea. *The Leading Edge*, 20(8), 896-900.
- Styles P. [2003] Environmental geophysics: a site characterization tool for urban regeneration in the post-mining era. *Geology Today*, 19(5), 173-178.
- Styles P. [2004] Detection of Caves by Microgravity Geophysics, Bahamas. In: Waltham, A.C., Bell, F.G., and Culshaw, M.G. (Eds) *Sinkholes and Subsidence*, 317-321. Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg.
- Styles, P., McGrath, R., Thomas, E., and Cassidy N.J. [2005] The use of microgravity for cavity characterisation in Karstic terrains. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 38, 155-169.
- Thompson, D. T. [1982] EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data. *Geophysics*, 47, 31-37.

