

Инженерная геология и геоэкология

**Аэроэлектромагнитная съемка оползня
An airborne EM survey of a landfill that leaked**

Британская геологическая служба подчеркивает необходимость и эффективность применения данных современной многоканальной аэрогеофизики в природоохранных мероприятиях на территории страны. В этой статье Дэвид Бимиш (David Beamish),* возглавляющий в БГС аэрогеофизику, описывает некоторые результаты, полученные при детальном обследовании старого оползня.

Добыча угля из горизонтов Lower и Middle Coal Measures велась по всей Центральной Шотландии. Часть выработок засыпана, но многочисленные пустоты все еще являются существенным элементом разреза. Природоохранное законодательство требует оценивать воздействие таких объектов на природу и возможность их рекультивации. В этой работе рассмотрено применение аэроэлектроразведки при исследовании засыпанного карьера Истфилд (Eastfield) в 2004 г. в Западном Лотиане (Lothian), Шотландия. Ранее здесь располагались угольные копи Полкеммет (Polkemmet). Целью работ была исследование возможностей метода при оценке воздействия на окружающую среду.

К настоящему времени в Великобритании совместными усилиями Британской и Финской геологических служб проведена серия работ с использованием систем с жесткой подвеской под крыльями. Система позволяет вести магниторазведку, радиометрию и частотное зондирование. (Peart et al., 2001). Применение аэроЧЗ при исследовании насыпных объектов рассмотрено Бимишем и Мэттсоном (Beamish, 2003; Beamish and Mattsson, 2003). Помимо съемки с самолета возможно использование вертолетов с буксируемой гондолой. В гондоле обычно устанавливаются магнито- и электроразведочные датчики. Гондола должна идти на очень малой высоте, обычно около 30 м, чтобы обеспечить нужное отношение сигнал/шум. Насколько известно автору, в этой статье впервые в Великобритании представляются данные детальной аэроэлектроразведки с вертолета при решении геоэкологических задач.

В работе представлены результаты обследования закрытой свалки с помощью аэроэлектроразведки с вертолета в крупном масштабе. Засыпанный старый карьер расположен среди неглубоких выработанных угольных пластов; в дне карьера располагались как минимум два шахтных ствола. В 1970-х годах, когда свалка еще эксплуатировалась, с помощью бурения установлено наличие утечек. При решении вопросов, связанных с возобновлением добычи, возникла необходимость оценить возможность загрязнения старыми отходами. Следовало, в частности установить, как далеко загрязнение может продвинуться по имеющемуся разлому на север, в область, подлежащую рекультивации. Данные аэрогеофизики (электро- и магниторазведка) получены на шести частотах с аппаратурой RESOLVE,

смонтированной в гондоле, при расстоянии между профилями 40 м. Для получения трехмерной геоэлектрической модели проведена одномерная регуляризованная инверсия. В модели насыпные грунты явно оказываются источником вещества с высокой электропроводностью, но не отличаются от других по геохимическому составу. Зоны с электропроводностью примерно втрое выше фоновой, отмечают, по-видимому, ряд ограниченных по глубине горизонтальных путей миграции, расположенных, в основном, ниже дна карьера. Данные наземной геофизики, поставленной в ограниченном объеме, в целом подтверждают модель по данным аэрогеофизики.

Методика аэроэлектроразведочных работ

Аэроэлектроразведочные работы проведены на шести частотах (0.4 – 110 кГц) с аппаратурой RESOLVE, установленной на вертолете, в рамках исследовательского проекта по применению аэроэлектроразведки в геоэкологии. Кроме того, выполнены измерения магнитного поля цезиевым магнитометром, также установленным на гондоле RESOLVE. Плановая высота полета составляла 30 м. Положение профилей, общей длиной около 54 пог. км, включая три секущих профиля для увязки, показано на рис. 1а.

Работами покрыта площадь 1х1.5 км, включающая засыпанный карьер и региональный разлом к северу от него. В ходе работ обнаружен ряд тонкостей при проведении детальной аэроэлектроразведки с буксируемой гондолой. На полеты над населенными пунктами разрешения не было, поэтому южнее объекта исследования профили искривлены по высоте и направлению. Плановое расстояние между меридиональными профилями составляло 20 м, но из-за сравнительно малого опыта пилота, удалось добиться расстояния лишь в 40 м.

Свалка в карьере Истфилд

Карьер Истфилд прорезает выход песчаников в пределах угольных залежей Lower Coal Measures на глубину 31-32 м. Карьер располагался на месте угольных шахт начала 19 века. Известно положение двух шахтных стволов и предполагается наличие еще одного. Заполнение карьера началось в 1950-е годы, когда его сдали в аренду под свалку бытовых отходов. С 1963 г. его стали использовать и под промышленные отходы – краски, растворители, масла, отстой и цианиды, т. е. в основном под жидкие отходы. С 1972 г., когда Закон о хранении ядовитых отходов (Deposit of Poisonous Waste Act) установил более жесткий контроль, было захоронено 47,000 куб. м жидких отходов (в том числе 33,500 куб. м – с маслами). На

*E-mail: dbe@bgs.ac.uk

Инженерная геология и геоэкология

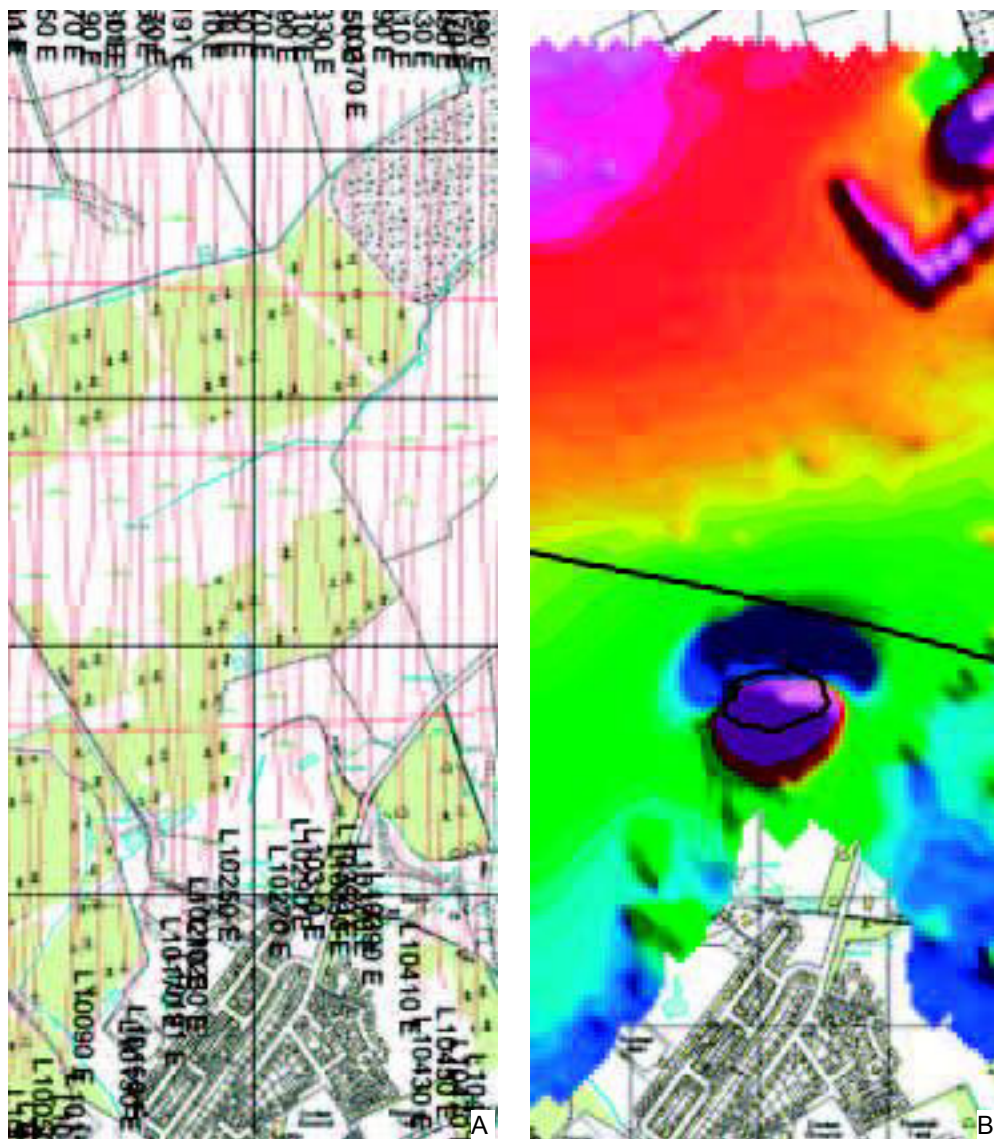


Рис. 1 (а) Положение профилей (красные линии) на карте масштаба 1:10000. (© Собственность Ее Величества. Все права защищены). Линии сетки проведены через 500 м. (b) Карта полного магнитного поля. Черным показаны линия разлома Полкеммет и контур бывшего карьера.

одном из стволов 19 века сформировалось постоянно существующее тело из жидких отходов. Фотоснимок действующей свалки представлен на рис. 2. Сброс твердых отходов прекращен в 1979 г, когда карьер засыпали и разровняли. Аэроэлектроразведка была поставлена через 24 года после закрытия.

В период эксплуатации свалки БГС провела там детальное гидрогеологическое обследование (Harrison et al., 1981). Было пробурено одиннадцать скважин, из них три в пределах свалки. Тогда, в 1974 г., была отмечена миграция жидкого загрязнения по стволам шахт и выработкам, окружающим участок. Протечки масел и кислот отмечены в подстилающих трещиноватых песчаниках, а также в 300 м вниз по падению (к западу) самой верхней выработки (радиальный забой Upper Drumgray).

Обширная область к северу от свалки предназначена для рекультивации в ходе амбициозного проекта возобновления добычи угля на старых угольных

шахтах. На начальных стадиях планируется добыча угля и горючих сланцев открытым способом. Экологические и технологические аспекты возобновления добычи возродили интерес к возможной миграции вещества. В числе главных – возможность миграции на север и вероятность движения в сторону от разлома.

Результаты магниторазведки

Как показано на рис. 1b, в данных магниторазведки на участке работ отмечаются две главных аномалии. Основная аномалия амплитудой 1000 нТл имеет дипольную структуру и связана со свалкой. Эта особенность поля, ориентированная в направлении север-юг, вызвана, по-видимому, остаточной намагниченностью железосодержащих отходов. Более мелкая аномалия в 100 нТл связана с участком подземного горения угля в отвалах, которое продолжается уже около 25 лет (отвал Полкеммет №3). На рис. 3 показан вид на южную сторону отвала.

Инженерная геология и геоэкология



Рис. 2. Свалка в карьере Истфилд, 1974.



Рис. 3. Южная часть отвала №3 в день работ.

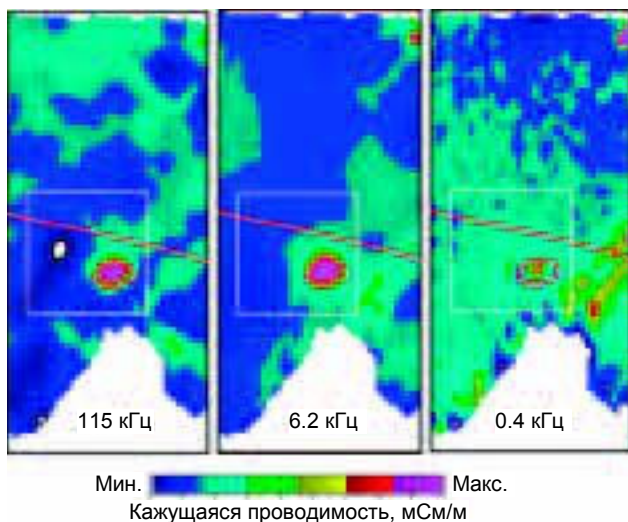


Рис.4. Карты кажущейся проводимости на частотах 115, 6.2 и 0.4 кГц. Красным показаны разлом Полкеммет и контур карьера. Прямоугольником отмечена область детального исследования размером 600 x 600 м.

Небольшая L-образная область повышенных значений магнитного поля на южной, более низкой стороне отвала соответствует зоне горения. Данные магниторазведки, несмотря на научный интерес, далее не обрабатывались.

Данные электроразведки

Данные электроразведки с аппаратурой RESOLVE представляют собой импедансы пяти двухпетлевых установок, расположенных в одной плоскости (номинальные частоты 400, 1500, 6200, 25000 и 115000 Гц) и одной установки «петля в петле» на частоте 3300 Гц. Отсчеты снимались 10 раз в секунду, что дало шаг по профилю 3.2 м. Данные можно использовать для построения карт кажущейся проводимости и построения примерной геоэлектрической модели.

Стандартная форма представления материалов – карты кажущегося сопротивления, рассчитанного по импедансам на каждой частоте. Результаты такого определения проводимости представлены на рис. 4. Результаты представлены от высоких частот к низким (от малой глубины проникновения поля к большой) на частотах 115000, 6200 и 400 Гц. На участке статистически рассчитаны глубины «центроидов», т. е. «центров тяжести» систем синфазных токов. Средние значения составили 6.9 м (115000 Гц), 14.5 м (25000 Гц), 27.5 м (6200 Гц), 54 м (1500 Гц) и 106 м (400 Гц). Максимальная проводимость свалки отмечена на частоте 6200 Гц. Глубины «центроидов» на этой частоте лежат в пределах 13-20 м.

Результаты рис. 4 показывают, что проводимость горизонтов Lower Coal Measure меняется в пределах 5-20 мСм/м (в 4 раза). Региональный разлом Полкеммет не имеет четкого выражения в проводимости. Этого следовало ожидать, поскольку, хотя южный блок опущен примерно на 100 м к югу, состав пород северного и южного блока одинаков.

С понижением частоты начинает проявляться аномалия проводимости в направлении северо-восток – юго-запад. Аномалия, наиболее отчетливо проявленная на частоте 400 Гц, имеет М-образную форму (максимум – минимум – максимум); ось аномалии направлена поперек разлома. Это – классическое проявление прямолинейного тока (силового кабеля). Данные трассоискателя аппаратуры RESOLVE подтверждает такое истолкование аномалии. Как видно из карт проводимости на рис. 4, с понижением частоты искажения возрастают и влияют на модели, рассчитанные по импедансам на значительной территории.

Эти процедуры, хотя и полезны, но не обеспечивают разрешения, достаточного для решения поставленных задач. Чтобы полностью использовать информацию, содержащуюся в данных, необходимо провести формальную инверсию всего спектра данных. В настоящее время стандартными для данных аэроэлектроразведки являются лишь одномерные процедуры инверсии. Далее такие модели можно сопоставить и получить представление о распределении проводимости в объеме

Инженерная геология и геоэкология

Процедура регуляризованной по Оккаму инверсии проводилась в нескольких вариантах. Здесь представлены результаты, полученные по алгоритму Чжана-Ольденбурга (Zhang and Oldenburg, 1999). Цель инверсии – найти модель, которая воспроизводит данные и имеет заданные свойства. К таким свойствам относится минимальное количество структур в вертикальном направлении и, в то же время, близость к опорной модели. За опорную модель принималось однородное полупространство, обеспечивающее минимальную невязку. Принято также, что проводящее тело свалки даст также: а) магнитную аномалию и б) трехмерные эффекты, которые не учитываются в ходе моделирования.

При ограниченной разрешающей способности по вертикали, такие модели весьма полезны при картировании изменений в объеме по горизонтали. При правдоподобной оценке точности данных (5%) в рамках 25-слойной модели (до глубины 100 м) на всем участке (кроме центрального профиля) значение невязки по критерию «хи-квадрат» близко к ожидаемому значению 12. Итоговые модели проводимости введены в программу трехмерной визуализации, позволяющую строить изоповерхности и изообъемы. Чтобы получить детальное представление о распределении проводимости и избежать искажений от силового кабеля, рассматривался участок размером 600 x 600 x 100 м, обозначенный на рис. 4.

На рис. 5 показан изообъем проводимости 200 мСм/м внутри выбранного объема, и ряд дополнительных элементов. Проводимость в 200 мСм/м имеют только хорошо проводящие материалы с высоким содержанием растворенных веществ; такие материалы четко приурочены к объему, локализованному внутри бывшей свалки. Контурами куба (синие линии) до глубины 30 м показано положение карьера/свалки. Вертикальными желтыми линиями показано положение и глубины скважин,

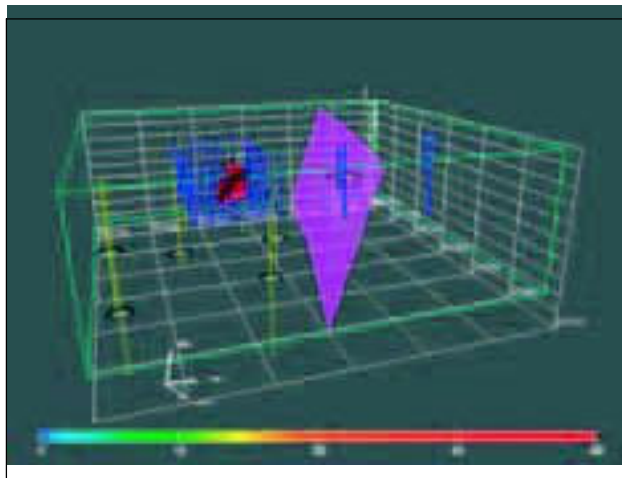


Рис. 5. Объемное изображение геоэлектрической модели участка детализации размером 600 x 600 x 100 м, вид с востока с высоты 2.5 Изообъем 200 мСм/м. Цветовая шкала в мСм/м. Пояснения см. в тексте.

поставленных в ходе работ 1970-х годов. Цветными горизонтальными кружками отмечен уровень подземных вод. Две группы синих вертикальных линий отмечают положения современных скважин к юг и к северу от разлома. Наклонная полупрозрачная плоскость отмечает разлом Полкеммет. Поскольку далее проводимость понижается, видны участки с меньшим содержанием растворенных веществ. Пониженные значения проводимости на уровне 35 мСм/м в 2-3 раза выше фоновых и могут относиться к зоне проникновения растворенных веществ из тела свалки.

На рис. 6 представлены основные элементы геоэлектрической модели. Использована изоповерхность 35 мСм/м. На глубине около 8 м к северу от свалки отмечается локальный прорыв проводящего вещества. Основной прорыв в северном направлении отмечается на глубине более 30 м; проводящий язык пересекает разлом

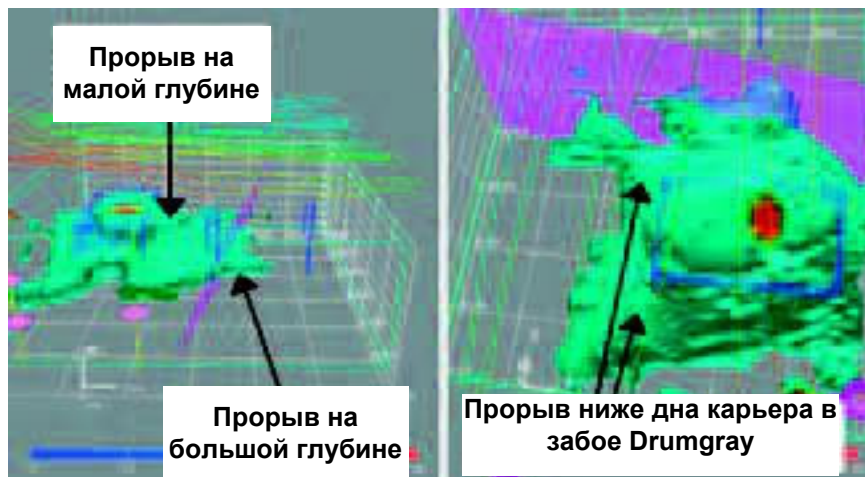


Рис. 6. Объемные изображения изообъема 35 мСм/м. Самые верхние линии – маршруты полетов. Остальные обозначения те же.

Инженерная геология и геоэкология

в основном глубже забоя современных скважин. К западу и юго-западу отмечается глубокий прорыв, положение и глубина которого соответствуют, по-видимому, забою Upper Drumgray. Эта структура отмечается и в результатах бурения, упомянутых ранее.

Поскольку сведений о проводимости пород на участке недостаточно, для подтверждения результатов аэрогеофизики проведены, в ограниченном объеме, также и наземные геофизические работы.

Последующие наземные геофизические работы

На следующем этапе после аэрогеофизики на участке поставлены пять точек ВЭЗ установкой Шлюмберже. Точки 02 и 05 находятся в пределах бывшего карьера/свалки. Точка 01 находится южнее разлома Полкеммет, а остальные две точки (03 и 04) составляют крестовый ВЭЗ к северу от разлома.

На рис. 7 показаны одномерные геоэлектрические модели для всех пяти точек. Глубина и проводимость даны в логарифмическом масштабе. Знаками показаны модели, полученные одномерной инверсией с регуляризацией по Оккаму. Такая инверсия дает гладкую модель с «минимумом слоев». Результаты получены в предположении точности данных 5%, невязка подбора – 1%.

Точки 01, 03 и 04 дают фоновую модель горизонта Lower Coal Measure. В показанном интервале глубин различие моделей в точках 03 и 04, расположенных к северу от разлома Полкеммет не превосходит 4-8 мСм/м.

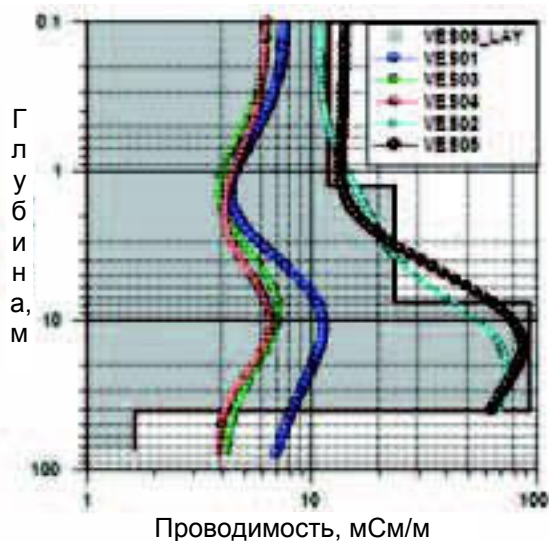


Рис. 7. Геоэлектрические модели по пяти точкам ВЭЗ. Знаками показаны гладкие модели по результатам инверсии. Для сравнения приведена слоистая модель для точки на территории карьера (VES05_LAY)

На точке 01, к югу от разлома, проводимость заметно выше, но форма всех трех кривых в целом совпадает. Зондирования в пределах карьера дают гораздо более высокую проводимость, особенно на глубинах более 1 м. Максимальная проводимость в обеих моделях отмечается в интервале глубин 15-20 м. Из-за ограничений по длине установки на этих точках достигнута меньшая глубинность, чем на точках 01, 03 и 04. Для сравнения приведена также слоистая модель для точки 05 (черная линия). Эта модель дает невязку в 2.1% и дает высокую проводимость (95 мСм/м) в интервале глубин 8 - 41 м. Анализ эквивалентности показывает, что подошва проводящего слоя устанавливается неточно.

Наземные исследования в целом подтвердили модель, построенную по данным аэрогеофизики. Фоновые значения проводимости горизонта Lower Coal Measure оказываются низкими и, хотя таких точек всего три, можно утверждать, что проводимость выше, скажем, 15 мСм/м связана с причинами негеологического происхождения. Подтверждена повышенная проводимость на всех глубинах в пределах карьера/свалки. Очень высокая проводимость отмечается глубже 8 м, хотя подошва проводника фиксируется неточно. Оценка в 40 м согласуется с моделью, полученной по данным аэрогеофизики.

Выводы

Работы методами аэроэлектроразведки с вертолета в районе Истфилд являются, возможно, первым в Великобритании применением этого метода при решении детальных геоэкологических задач. В ходе работ выявлен ряд тонкостей в сборе данных в таком масштабе. В их числе – сложность обеспечения приемлемого покрытия площади профилями, а также значительное влияние имеющихся силовых кабелей.

В данных магниторазведки отмечаются две главных аномалии. Крупная аномалия дипольной структуры амплитудой в 1000 нТл связана со свалкой. Ее направление с севера на юг связано с остаточной намагниченностью железосодержащих отходов. Более мелкая аномалия в 100 нТл связана с областью длительного подземного пожара в отвалах (отвал Полкеммет №3).

Для полного использования информации, содержащихся в электромагнитных данных на шести частотах проведена одномерная инверсия. В полученной геоэлектрической модели прослеживаются проводящие материалы, связанные со свалкой и ранее (30 лет назад) установленными утечками из нее. Область прорыва проводящего вещества отмечает к северу от свалки на глубине около 8 м. Основной прорыв на север отмечен на глубине более 30 м; проводящий язык пересекает разлом ниже забоя современных скважин. К западу и юго-западу отмечается глубокий прорыв, положение и глубина которого соответствуют, по-видимому, забою Upper Drumgray. Эта структура отмечается и в результатах бурения.

Инженерная геология и геоэкология

Наземные исследования в целом подтвердили модель, построенную по данным аэрогеофизики. Фоновые значения проводимости горизонта Lower Coal Measure оказываются низкими и, хотя таких точек всего три, можно утверждать, что проводимость выше, скажем, 15 мСм/м, связана с причинами негеологического происхождения. Границы прорывов приведены по изобъему 35 мСм/м. Подтверждена повышенная проводимость на всех глубинах в пределах карьера/свалки.

Из-за низкой проводимости горизонта Coal Measures, прослеживается миграция только проводящей компоненты утечки. Согласно Гаррисону (Harrison et al., 1981), основными возможными загрязнителями являются тяжелые металлы, кислоты и органические вещества (в основном масла). Биodeградация в горных выработках вряд ли будет интенсивной из-за условий, не способствующих аэробным процессам. Масла, составляющие лишь 10% процентов отходов, останутся непроводящими. Поэтому высокую проводимость следует связывать с кислотами и растворимыми сульфатами в высоких (более 1000 мг/л) концентрациях, содержащимися в грунтовых водах, что установлено бурением 1970-х годов. Точная геохимическая природа проводящих прорывов останется спорной до внедрения современных методов контроля.

Благодарности

Весьма полезной была помощь Грегга Палеолога (Greg Paleolog) и исполнителя проекта от компании Fugro Airborne Surveys Майка Кейна (Mike Cain). Наземные геофизические работы выполнили сотрудники БГС Майк Рейнс (Mike Raines) и Рис Купер (Rhys Cooper).

Литература

Beamish, D. [2003] Characterising landfills from the air. *First Break*, 21, 10, 67-72.

Beamish, D. and Mattsson, A. [2003] Time-lapse airborne EM surveys across a municipal landfill. *J. Environmental & Engineering Geophysics*, 8, 157-165.

Harrison, I.B., Parker, A., and Williams, G.M. [1981] Investigation of the landfill at Eastfield Quarry, Fauldhouse, Westlothian, Scotland. *Institute of Geological Sciences Report 81/13*.

Peart, R.J., Cuss.R.J., Beamish, D., and Jones, D.G. [2003] Locating and mapping potential environmental hazards in the UK with high resolution airborne geophysics. *Geoscientist*, 13, 7, 4-7. Zhang, Z. and Oldenburg, D.W. [1999] Simultaneous reconstruction of 1D susceptibility and conductivity from electromagnetic data. *Geophysics*, 64, 33-47.