

## Экологическая и инженерная геофизика

Геофизические работы экологического направления в условия городов  
Environmental geophysics investigations in urban area

**Доктор Джон М. Рейнольдс\* (John M. Reynolds), управляющий директор и главный геофизик компании Reynolds Geo- Sciences, представляет некоторые результаты, показывающие, как можно преодолевать трудности, возникающие при высоком уровне помех в городских условиях, и получать полезные данные, пригодные для интерпретации, иногда – вопреки ожиданиям заказчика.**

**В** городских условиях обстановка наиболее трудна для проведения геофизических работ. Тесное пространство, движение транспорта, высокий уровень помех (электрических и сейсмических), подземные коммуникации и т. п. – все это усложняет планирование работ и разбивку сети наблюдений. Во многих случаях участок невозможно исследовать из-за отсутствия соответствующих методик, аппаратуры или программного обеспечения для последующей обработки. Значительные изменения в оборудовании и программах, произошедшие в последние годы, позволяют применять геофизические методы там, где ранее это было невозможно.

Сначала мы рассмотрим работы на участке Филд Роуд в г. Рединг, графство Беркшир (Field Road, Reading, Berkshire). Это был крупный, трудный и технически сложный проект. В ходе этого проекта с помощью высокоточной гравиразведки путем тщательного планирования работ, уделяя особое внимание сбору данных, вычислению редукций и моделированию, удалось откартировать целый лабиринт меловых шахт неглубокого заложения

Далее речь пойдет об изысканиях под застройку на северо-западе Лондона, где результаты инженерно-геологических изысканий (бурения) были признаны неудовлетворительными Агентством по окружающей среде (Environment Agency), природоохранным правительственным органом в Англии и Уэльсе (отдельный аналогичный орган есть и в Шотландии). Заказчик и его специалисты по инженерной геологии были скептически настроены относительно возможностей геофизики. Несмотря на технические трудности на частично освоенной стройплощадке со сложным геологическим строением, геофизические исследования позволили наметить места для буровых работ. Польза от такой интеграции стала очевидной. Познакомившись с результатами, заказчик и его специалисты стали ярыми сторонниками геофизики.

Третий пример сильно отличается от предыдущих. Хотя участок расположен в городе, он находится на открытой местности. В ходе работ применен хорошо известный испытанный метод с применением электроразведочной аппаратуры Geonics EM31. (Детали методики описаны автором (Reynolds, 1997)). Этот пример показывает, что даже простые, хорошо известные методы, примененные в простых вариантах, могут дать очень ясные и наглядные результаты.

Напоследок мы поговорим о работах на бывшем оползне на юге Уэльса. На участке площадью 12.6 га развернулись земляные работы. Уже в разгар работ возникло подозрение, что под землей погребены стальные катушки, но их местоположение неизвестно. Без прекращения интенсивных строительных работ на участке проведены детальные геофизические работы, в основном – съемка градиента магнитного поля, по результатам которых катушки были обнаружены и успешно выкопаны. Особенностью всех этих работ является участие в них «советников по инженерной геофизике» - независимых от подрядчика специалистов очень высокой квалификации. Привлечение таких специалистов предлагается в недавних рекомендациях по применению геофизики в инженерно-геологических (и геоэкологических) изысканиях (McDowell et al., 2002).

**Пример 1: участок Филд Роуд, г. Рединг, графство Беркшир, Великобритания**

4 января 2000 в районе Филд Роуд в г. Рединг, графство Беркшир, Великобритания, образовался провал грунта объемом 200 м<sup>3</sup>. Провал предположительно связали с обрушением старых горных выработок в меловых шахтах. После эвакуации населения исследования были продолжены. Проведение этих экстренных изысканий городской совет Рединга поручил компании Peter Brett Associates; компания Reynolds Geo-Sciences (RGS) стала консультантом по геофизике. RGS должна была планировать детальные геофизические работы, контролировать их проведение и интерпретировать полученные данные. Работы проведены в два этапа (Reynolds and Edmonds, 2001). На каждом этапе проводились высокоточные гравиметрические работы на отдельных участках в районе Филд Роуд и на примыкающих участках общественных земель (автостоянках), а также во дворах пострадавших и близлежащих зданий.

Верхняя часть разреза участка представлена Редингской формацией (глины и пески мощностью до 3-4 м), перекрывающей отложения верхнего мела, кровля которых залегает на глубине около 6 м. В отдельных местах обнаружены алевролитистые глины и пески с гравием кремня, мела и кирпича, а также карманы, выполненные песчанистыми глинами и песками от грубо- до среднезернистых с линзами серых глин. По-видимому рядом находился рекультивированный

\*Reynolds Geo-Sciences, 2 Long Barn, Pistyll Farm, Nercwys, Mold, Flintshire, CH7 4EW, UK.

## Экологическая и инженерная геофизика

карьер, заполненный разнородным материалом (песок, глина, зола, керамика, в том числе трубы, кирпич, черепица, обломки дерева и т. п.).

Исследование участка включало опробование грунтов на прочность по частой сети (обычно с шагом 1.5-2 м) и высокоточную гравиметрию. Последняя применялась для предварительного обследования перед бурением как средство выделения зон измененного грунта, грозивших обрушением при проведении буровых работ.

Жители центральной части района Филд Роуд, где произошло само обрушение, были эвакуированы из-за риска повторных обрушений. В этой зоне бурение и высокоточная гравиразведка проводились практически одновременно. В других частях района Филд Роуд сначала проводились гравиметрические работы, а уже затем бурение. Это делалось еще и потому, что для укрепления грунтов найденные полости заливались цементом, и нужно было обеспечить проход тяжелой техники и подвоз материалов к местам таких работ.

Тем не менее, было не ясно, не проходит ли сама подъездная дорога по ослабленным грунтам и пустотам. Анализ ситуации показал, что риск весьма велик, и было принято решение проверить состояние



Рис. 1. Работа с высокоточным гравиметром в районе Филд Роуд, г. Реддинг. На заднем плане – зона обрушения.

северной части дороги. В ходе этих работ путем интерпретации данных высокоточной гравиразведки были обнаружены зоны ослабленного грунта и несколько пустот.

Изменения силы тяжести в районе Филд Роуд связаны с подземными полостями, пустыми, или заполненными материалом (например, глинами или песками реддингской формации), плотность которого меньше, чем у подстилающих мелов с плотностью 1800 кг/м<sup>3</sup>. Возможность наличия значительных аномалий силы тяжести связана с относительно малой (6-10 м) глубиной до верхней части выработок, размеры которых составляют 4-5 м в высоту и 3-4 м в ширину.

Для измерений использован гравиметр Scintrex CG-3M Autograv (рис. 1). Работы проведены по сети 2 x 2 м, с некоторыми отклонениями, связанными с возможностью пройти к точке наблюдения. Обработка данных состояла в расчете аномалий силы тяжести в редукции Буге. Перепады высот рельефа в районе Филд Роуд в общем невелики (менее 1 м), поэтому поправки за рельеф в собственном смысле слова не вводились. Пришлось однако рассчитать эффекты зданий, расположенных рядом с участком.

В ходе экспериментов промоделировано проявление в поле силы тяжести зданий различных архитектурных

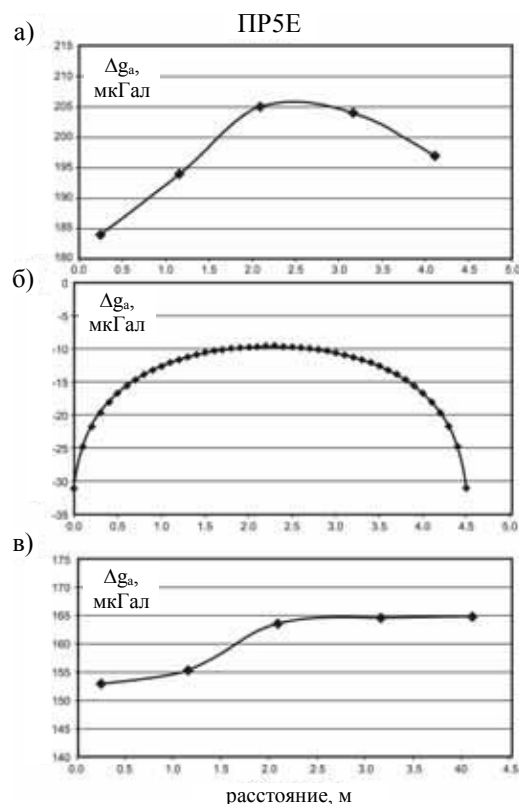


Рис. 2. Поправки в значения поля силы тяжести в редукции Буге для учета эффектов зданий и изгородей. (а) Исходные значения силы тяжести в редукции Буге; (б) расчетный эффект двух стен на концах профиля; (в) в остаточной аномалии после ввода поправок на первых 2 м профиля видно наличие насыщенной полости.

## Экологическая и инженерная геофизика

стилей, от викторианских особняков с террасами до многоквартирных домов 1980-х годов. Моделирование проведено для различных конфигураций стен различной толщины и высоты; результаты моделирования сопоставлены с данными по большей части района Фил Роуд. Оказалось возможным построить карты проявлений зданий в поле силы тяжести на территории района, учитывающую даже фундаменты, положение которых было известно. Плотность строительного кирпича, в соответствии с информацией производителя, была принята  $2100 \text{ кг/м}^3$ . Величина аномалий силы тяжести в непосредственной близости от зданий оказалась порядка  $20 \text{ мкГал}$ , но уже на расстоянии  $1 \text{ м}$  от внешней стены их амплитуда уменьшается до менее чем  $5 \text{ мкГал}$  (рис. 2). На рис. 2а, показан пример полевых данных по профилю из пяти точек, пересекающему аллею шириной  $4.25 \text{ м}$  между двумя домами. По этому профилю было рассчитано поле силы тяжести (рис. 2б), значения которого использованы как поправки для расчета аномалии Буге. На рис. 2в (график аномалии силы тяжести в редукции Буге) видно, что значения в трех точках в правой части профиля изменились мало, а на двух первых точках значения уменьшились до примерно  $12 \text{ мкГал}$ . Последующее бурение в этой зоне подтвердило наличие обрушения кровли горной выработки, предсказанного по результатам интерпретации геофизических данных.

После исключения влияния зданий из значений аномалий Буге была построена карта приведенных значений аномалий силы тяжести (рис. 3). Затем для территории проведено моделирование поля силы тяжести (подбор плотностной модели) с помощью общедоступного программного обеспечения. Для улучшения качества подбора были установлены ограничения по плотности, которые выдерживались с опорой на профили с априори известным положением подземных полостей.

Высокоточная гравиразведка позволила выявить четкие признаки наличия примерно прямоугольной сети галерей под домами района Филд Роуд. В ряде мест обнаружены выходы отдельных галерей за пределы участка работ. Позднее над некоторыми из этих выходов были найдены старые провалы, но неизвестные до проведения этих работ. По результатам высокоточной гравиметрии установлено также примерное положение границ рекультивированного карьера и, кроме того, выделены области возможного развития засыпанных подработанных территорий, где, если не принять меры, вероятно продолжение проседания грунтов.

На одном из участков по результатам интерпретации геофизических данных установлено, что верхушка полости, образовавшейся при обрушении кровли шахты, находится на глубине менее  $1 \text{ м}$ ; исходя из этого, буровики особо закрепили свое оборудование и работали со страховкой на случай повторного обрушения. Таким образом, была повышена безопасность работ на участке.

Результаты интерпретации данных обоих этапов гравиметрической съемки проверены путем бурения.

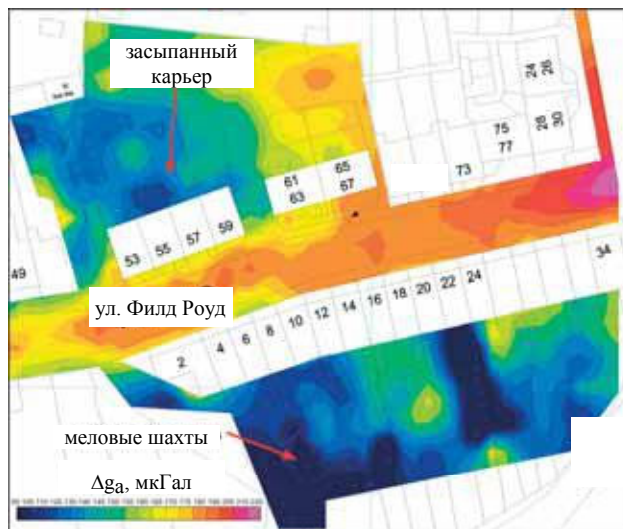


Рис. 3. На карте аномалий Буге, исправленных за эффекты зданий и низких стен, видны минимумы, связанные с засыпанным карьером и старыми меловыми шахтами; большинство из них подтверждены бурением.

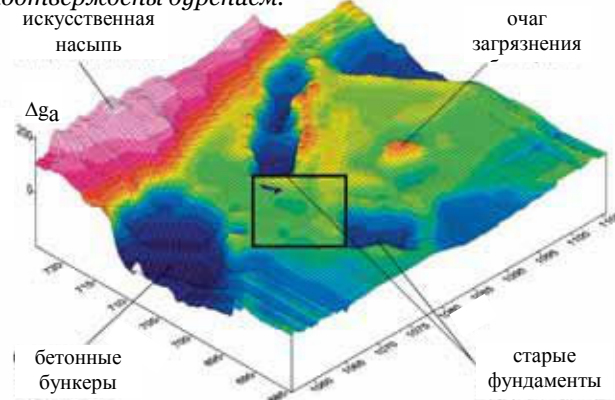


Рис. 4. Изометрическое изображение части данных электроразведки по стройплощадке на северо-западе Лондона. Правые углы старых фундаментов обрисовывают контур ранее стоявшего здесь здания.

Сходимость результатов как по расположению галерей, так и по их размерам оказалась высокой. Успех применения метода позволил рекомендовать его для последующих работ на большей территории в районе Филд Роуд. Сейчас идет процедура официального утверждения этой методики.

Применение высокоточной гравиразведки в ходе обследования состояния грунтов в районе Филд Роуд оказалось весьма успешным при оценке риска дальнейших обрушений и для предварительного обследования перед бурением и ремонтно-восстановительными работами. Высокая степень корреляции между моделями, построенными по геофизическим данным и по результатам бурения, позволяет уверенно применять метод даже в сложных городских условиях. Следует, однако, отметить, что такой



## Экологическая и инженерная геофизика

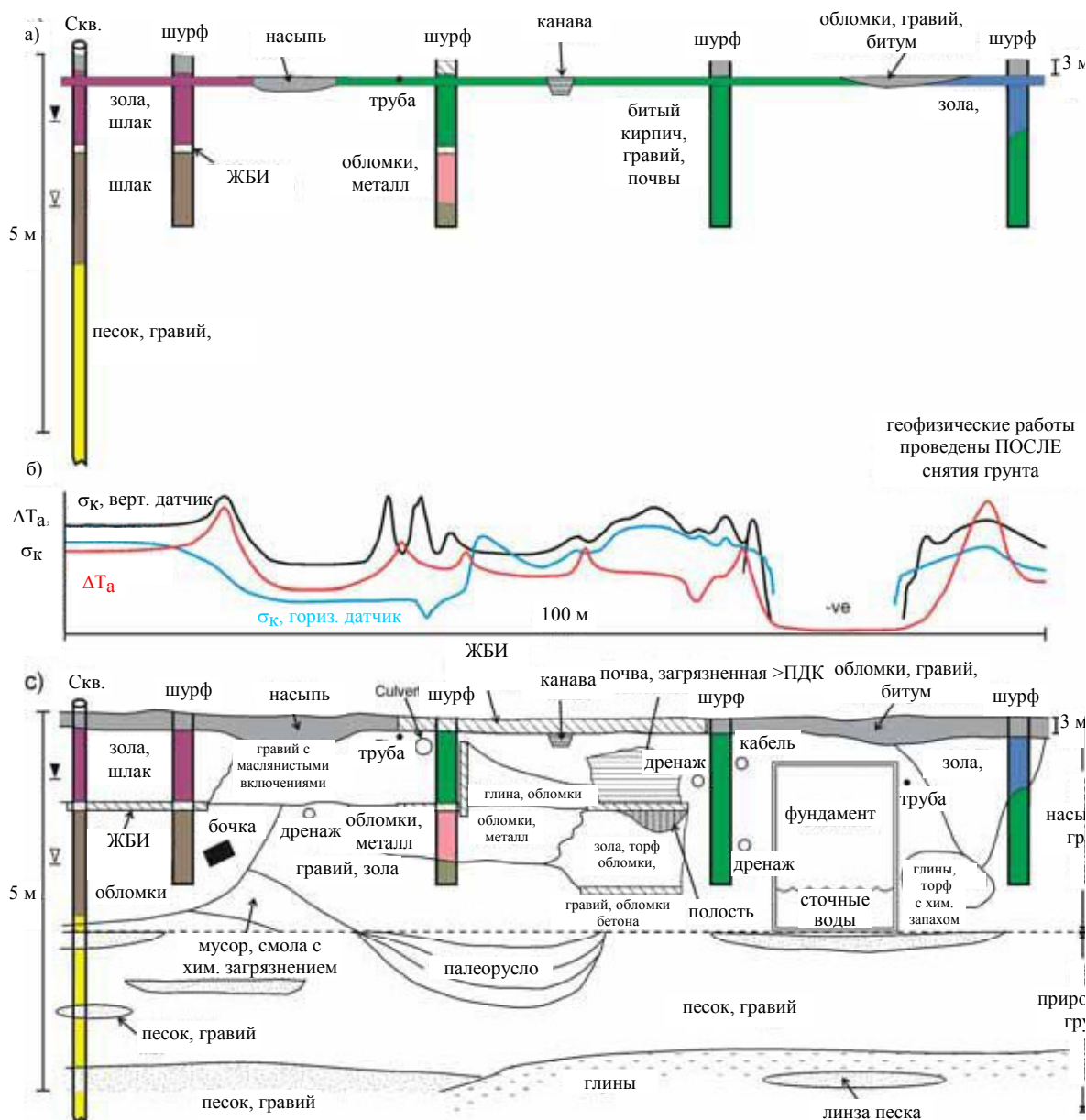


Рис. 5. (а) Разрез по одной скважине, трем шурфам и описанию снятого слоя грунта (300 мм); (б) Данные магниторазведки и электроразведки с вертикальным и горизонтальным датчиком по одному профилю; (в) Разрез по результатам совместной интерпретации данных геофизики и прямых методов исследования.

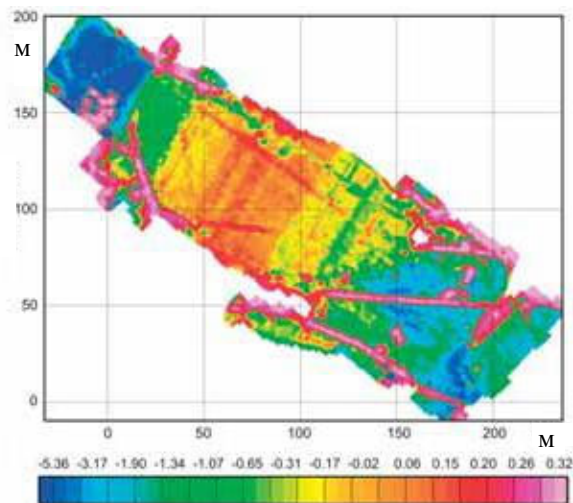
успех обусловлен высоким вниманием к качеству полевых данных и, в особенности, особым способом обработки, позволяющим учесть гравитационный эффект отдельных зданий.

### Изыскания под жилищное строительство в северо-западной части Лондона

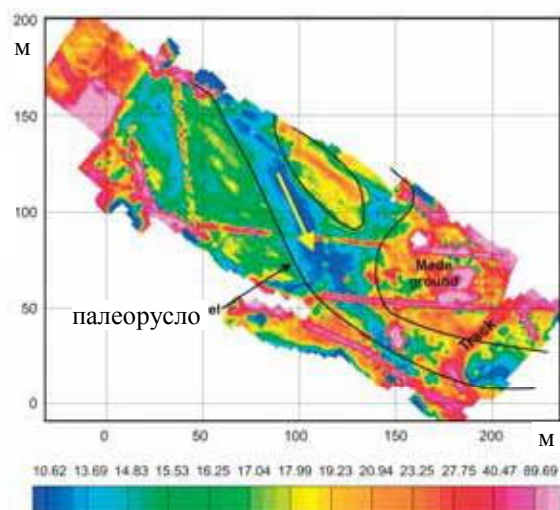
Заказчиком по этому проекту выступала строительная фирма. Она сама успешно провела три этапа инженерно-геологических изысканий на территории бывшего завода с применением шнекового и колонкового бурения, а также шурфовки. Затем в ходе подготовки стройплощадки был срезан верхний слой грунта толщиной до 300 мм. Перед самым началом строительства Агентство по окружающей среде

остановило работы из-за опасений, что при земляных работах загрязнения из старых фундаментов попадут в канал, протекающий вдоль северной границы площадки. Продолжать бурение также не разрешили, и единственным для заказчика способом решить проблему остались дистанционные методы исследования. В ходе геофизических работ применен комплекс методов в составе электроразведки с аппаратурой Geonics EM31 и магниторазведки с градиентометром Geometrics G-858. Наблюдения выполнены по сети профилей, расположенных на расстоянии 2 м один от другого с шагом по профилю 1 м для EM31 и 0.2 м для съемки градиента магнитного поля.

## Экологическая и инженерная геофизика



Синфазная компонента, %



Интегральная компонента, мСм/м

Рис. 6. Результаты электроразведки с аппаратурой ЕМЗ1 (горизонтальный датчик) на открытой местности (футбольные поля, площадки для крикета, газоны и парки). Вверху - синфазная, внизу - интегральная компоненты.

На рис. 4 представлены в изометрической проекции данные электроразведки по небольшому фрагменту участка. Зона повышенных значений кажущейся проводимости (термин «кажущаяся проводимость», редко употребляемый в русской литературе, сохранен для соответствия текста и иллюстраций – прим. перев.) вдоль северо-западной границы связывается с насыпью вдоль берега канала, сделанной из строительного мусора, содержащего, среди прочего, асбест. Выделено также несколько зон с очень низкой кажущейся проводимостью, позднее соотнесенных с засыпанными фундаментами и погребями. Две из этих аномалий оказались перпендикулярны одна другой и находятся на месте бывшего здания. Выделен также небольшой максимум кажущейся проводимости, связан со старой кучей золы – объектом, нежелательным на территории будущих садов местных жителей.

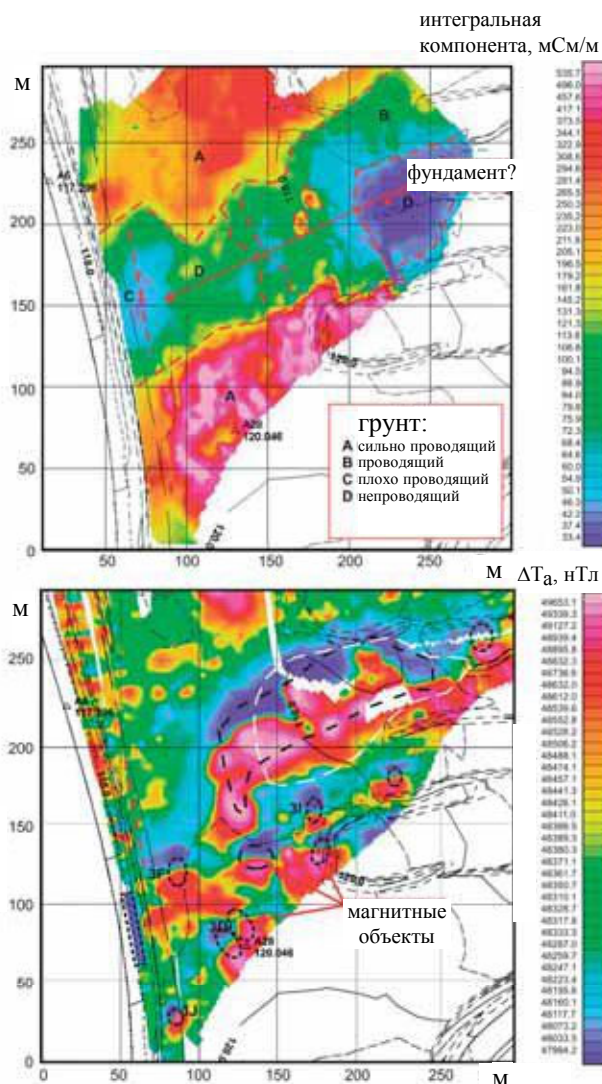


Рис. 7. Карта проводимости грунтов по данным работ с ЕМЗ1 (а) и карта магнитного поля (б) по небольшому участку засыпанного карьера. Видны несколько магнитных аномалий дипольной природы. Шурфовка одной из них вскрыла бочку, обломки металла и связанное с ними загрязнение.

Перед началом геофизических работ заказчик был настроен скептически относительно их пользы и считал их просто еще одним затратным фактором, снижающим его доходы. Польза, однако, проявилась быстро, сразу по завершении геофизических работ и заверочной шурфовки, проведенной с разрешения Агентства по окружающей среде. По результатам интерпретации геофизических данных были даны по размещению шурфов в местах, где геофизические аномалии свидетельствовали о наличии проблемных зон, и где не было дренажных труб (которые выделялись по данным электроразведки и магниторазведки), по которым загрязнение могло проникнуть в канал. Модель строения участка, построенная по данным первоначального бурения и результатам геофизических работ, содержала значительно больше деталей, чем было известно до применения геофизики (рис. 5).

## Экологическая и инженерная геофизика

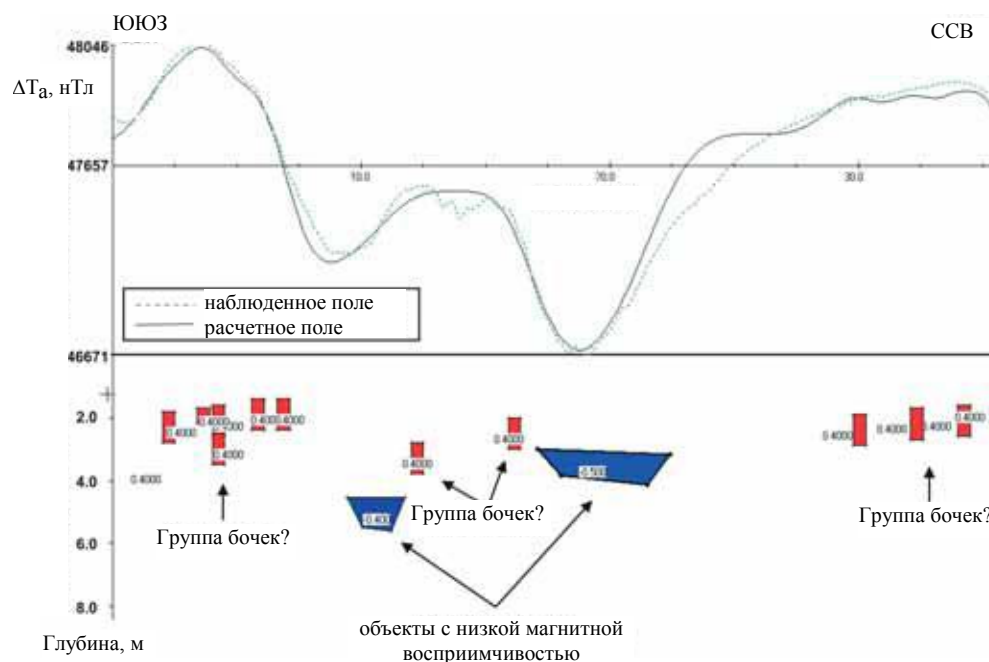


Рис. 8. Магнитная модель по результатам интерпретации данных, измеренных нижним датчиком градиентометра. У блоков подписаны значения избыточной магнитной восприимчивости.

Опираясь на результаты шурфовки, удалось построить карту распространения различных типов материалов. Обнаружены и затем устранены старые фундаменты и связанные с ними трубы и дренажные канавы. Найденные опоры и погребы укреплены. Если бы не геофизические исследования, строительная техника могла наехать на них и, несомненно, провалилась бы через очень старые потолки. Более того, в погребях обнаружены скопления сточных вод, загрязненные углеводородами из брошенных бочек, которые могли бы вызвать длительное загрязнение и стать постоянной угрозой здоровью будущих жителей.

Когда заказчик увидел, что удалось найти в ходе геофизических работ, он признал, что затраты на геофизику окупились уже тем, что найдены погребы, не говоря об остальных обнаруженных помехах, позднее устраненных. Кроме того, Агентство по окружающей среде было довольно тем, что исследование и последующее освоение территории удалось провести с минимальным риском дальнейшего загрязнения близлежащего канала и безопасно для будущих жителей.

### Изыскания под жилищное строительство в Великобритании

Методика геофизических работ может быть нацелена на исследование конкретных объектов, а применяемые методы сами по себе неизбирательны – если есть контраст физико-химических свойств данного объекта и вмещающей среды, геофизические методы могут почувствовать этот объект. Недавно по поручению Агентства по окружающей среде проведены геофизические работы для обнаружения дренажной

системы на участке общественных земель, который предполагалось передать под жилищное строительство.

На участке проведены электроразведочные работы с аппаратурой ЕМ31. Поскольку объекты поиска располагались на очень малой глубине, регистрировалась только горизонтальная магнитная компонента. Результаты работ представлены на рис. 6.; дренажные канавы легко выделяются по линейным аномалиям как на синфазной, так и на интегральной компоненте. Неожиданно на участке обнаружено палеорусло. Участок расположен в пределах этой долины, а рядом протекает река. Конфигурация палеорусла четко видна в интегральных данных; направление течения в прошлом показано в соответствии с настоящим. Область насыпного грунта характеризуется повышенными значениями кажущейся проводимости и зашумленными данными, в отличие от областей естественного грунта на правом берегу реки (левая часть рисунка). Присутствие палеорусла открывает путь возможного распространения загрязнений, а также влияет на движение подземных вод, что немаловажно при последующем освоении участка.

### Бывшие карьеры в южном Уэльсе

На территории засыпанного карьера в южном Уэльсе начались работы по выравниванию площадки для подготовке к жилищному строительству. Несколько подобных карьеров в том же районе были засыпаны смесью материала карьерных и шахтных отвалов, мазутной сажой, шлаком предприятий тяжелой промышленности и загрязненными промышленными отходами, а также бытовым мусором. Кроме этого, в 1950-х



## Экологическая и инженерная геофизика

годах в карьере закопали стальные бочки, но положение их было неизвестно, и их найти при последующих изысканиях не удалось. В ходе земляных работ карьеры были засыпаны.

Уже на этой поздней стадии освоения участка было решено все же найти и затем убрать бочки. Лучше поздно, чем никогда! Чтобы не раскапывать весь участок заново, были спланированы и проведены геофизические работы. Большая часть участка была покрыта съемкой градиента магнитного поля с градиентометром Geometrics G858, смонтированным на немагнитной платформе, буксируемой четырехколесным мотоциклом. Привязка точке проводилась с использованием дифференциального GPS. На одном из планшетов участка выполнена также электроразведка с аппаратурой Geonics EM31; при съемке с вертикальным датчиком последний был закреплен на выносной балке буксира, съемка с горизонтальным датчиком проведена в пешеходном варианте. Быстрая и точная привязка по дифференциальному GPS в сочетании с быстрой записью данных в примененной аппаратуре позволили быстро покрывать съемкой большие площади.

Результаты электроразведки и магниторазведки по небольшому фрагменту участка представлены на рис. 7а и 7б соответственно. Видно, что данные электроразведки определяются целиком электропроводностью грунта (рис. 7а), в то время как в магнитном поле присутствуют интенсивные аномалии дипольной структуры (рис. 7б). По ряду профилей проведен подбор магнитных моделей, по результатам которого поставлены заверочные шурфы, вскрывшие объекты, порождающие аномалии (рис. 9). Таким образом, продемонстрирована эффективность использованных быстрых и точных методик геофизической и топографической съемки.

### Заключение

Современная геофизическая аппаратура в сочетании со скоростными способами регистрации данных и иногда с одновременной привязкой по дифференциальному GPS позволяет покрывать съемкой по густой сети значительные площади с большей производительностью, чем когда-либо ранее. Появление в последнее время высокоточных гравиметров в сочетании с улучшенными способами расчета редукций и подбора моделей позволили использовать высокоточную гравиметрию в городских условиях при высоком уровне шумов. Сочетание геофизических работ с заверкой их результатов прямыми методами (бурение и др.) дает специалистам по инженерной геофизике набор мощных средств решения задач.

Приведенные примеры показывают, что работы, тщательно спланированные советником по инженерной геофизике и проведенные специализированными организациями, с последующим детальным анализом, подбором моделей и геологической интерпретацией данных, дают максимальный эффект. Также существенно, чтобы исполнитель геофизических работ был нацелен



Рис. 9. Источник одной из дипольных аномалий магнитного поля (рис. 7). В бочках содержатся углеводороды, краска и пр.

на получение качественных данных и применение как геофизических, так и прямых методов исследования.

Наибольший технологический и экономический выигрыш дает применение результатов геофизических работ для выбора мест последующего применения прямых методов с обнаружением объектов, порождающих геофизические аномалии. Специалисты, как по геофизике, так и по инженерной геологии должны признать, что путь к достижению наилучших результатов лежит через сотрудничество, а не через соперничество. Привлечение советников по инженерной геофизике, лучше – на ранних стадиях работ, позволяет получить максимальный выигрыш и должно быть признано «наилучшим из возможного».

### Благодарности

Автор очень признателен Агентству по окружающей среде, городскому совету г. Рединга, компании Walters и другим организациям, позволившим опубликовать результаты работ, проведенных по их заказам. Автор благодарен сотрудникам RGSL Хелен Томас (Helen Thomas) за помощь в подготовке рисунков к этой работе и доктору Джеми Принглу (Dr. Jamie Pringle) за участие в двух из рассмотренных проектов, а также организациями, выполнявшим полевые работы под началом RGSL.

### Литература

- McDowell, P. and others. [2002] Geophysics in engineering investigations. *Special Publication 19*, CIRIA and Geological Society Engineering Geology.
- Reynolds, J.M. [1997] *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley and Sons, London.
- Reynolds, J.M. and Edmonds, C.N. [2001] Micro-gravity investigation of Chalk mines at Field Road, Reading. In: Hill, I. (ed.). *Proceedings of the 7th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysics Society, Birmingham, UK, 2-6 September 2001*, EEGS and the Geological Society of London, 130-131.