

Экологическая и инженерная геофизика

Геофизические методы при поиске неразорвавшихся боеприпасов Developing geophysical techniques for detecting unexploded ordnance

Сотрудники австралийской компании Geophysical Technology (G-tek), главный технолог Джон М. Стенли¹ (John M Stanley) и начальник научно-исследовательского отдела Малкольм К. Кэттеч² (Malcolm K Cattach) размышляют о возрастающей потребности в малозатратных способах обнаружения неразорвавшихся боеприпасов

Проблема скрытой угрозы от неразорвавшихся боеприпасов (НРБП) стоит со времен появления разрывных снарядов. В конфликтах XX века доля несработавших боеприпасов достигает 20%, и долгое время после прекращения конфликта эти боеприпасы остаются в земле. Если их потревожить или вещества из них попадут в подземные воды, они по-прежнему могут привести к ранениям, смерти и материальному ущербу. Кроме того, НРБП – потенциальный источник взрывчатых веществ для террористов. Другим значительным источником загрязнения окружающей среды НРБП являются военные учения.

Представить широту этой проблемы можно по сообщению Министерства обороны США: «Зачистка от НРБП – очень масштабное мероприятие, которое следует провести на примерно 1400 объектах общей площадью 10 млн. акров. Общая стоимость работ оценивается в десятки миллиардов долларов». Проблема касается не только США. Считается, что ситуация в Восточной Европе еще хуже. Вряд ли есть страна, где не происходит загрязнения и нет угрозы взрыва от НРБП.

Обнаружение НРБП в земле – задача, средства для решения которой могут дать геофизики, занимающиеся изучением верхней части разреза. Более того, геофизики, занимающиеся проблемой НРБП, сейчас работают на таком уровне качества, что у них могут поучиться коллеги, занимающиеся поисками нефти, газа и твердых ископаемых. Где еще геофизик несет ответственность за то, что не нашел то, что можно найти при нынешнем развитии техники?

История решения

После двух мировых войн Европа оказалась на переднем крае борьбы с НРБП. Производители специального оборудования и компании по утилизации боеприпасов работают по крайней мере с 1945 г. Большую часть этого времени применялось оборудование с аналоговыми датчиками, измеряющими электромагнитную индукцию или градиент магнитного поля. Рядом с металлическим объектом эти «миноискатели» дают звуковой сигнал, некоторые модели имеют также стрелочный индикатор. Опытные операторы хорошо разбираются в этих признаках. Но как записать сам



Работы по методу дозвуковой магниторазведки при поисках НРБП в долине Хелена, штат Монтана. Используется счетверенный переносной датчик.

процесс поиска и получить количественные оценки надежности? Количество найденных предметов можно подсчитать, но как подсчитать то, что осталось в земле? Как доказать в суде, что с оборудованием работали, как положено, или, хотя бы, что прибор был включен? Впервые важность цифровой техники, позволяющей оценить качество работ, для поиска НРБП признало Министерство обороны Австралии. В 1987 оно закупило магнитометры с цифровой записью и автоматической пространственной привязкой данных, измеряющие полный вектор поля. Была внедрена система цифровой обработки сигнала, позволившая увеличить возможности обнаружения, в том числе в присутствии геологических шумов. Разработаны процедуры численной оценки качества, позволившие проводить независимые проверки. Приход цифровых технологий превратил поиск НРБП из искусства для посвященных в точную науку.

На рис. 1 и 2 представлены данные, показывающие достоинства цифровых технологий для повышения качества работ. На рис. 1 показан модуль полного вектора магнитного поля на площади 0,5 га до удаления посторонних объектов. На рис. 2. показана та же величина

¹jstanley@g-tek.biz
²mcattach@g-tek.biz

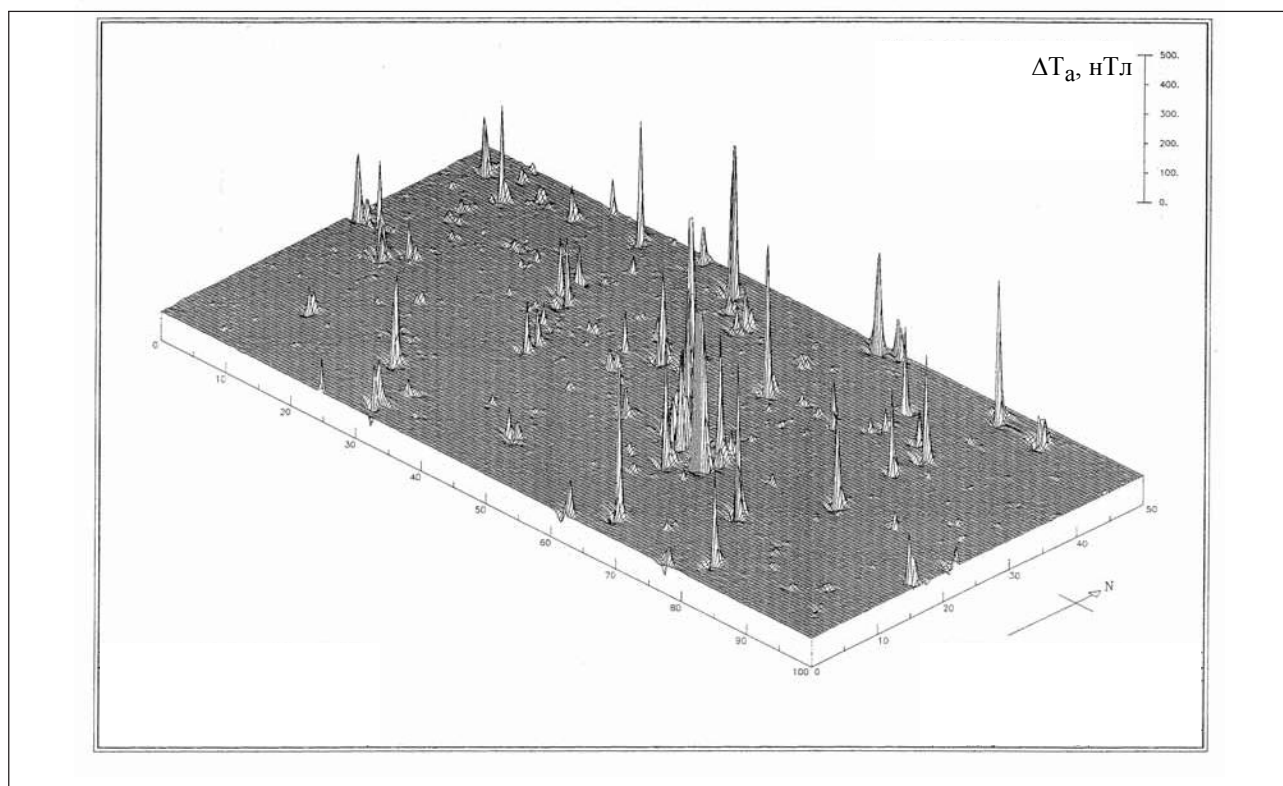


Рис. 1. Модуль полного вектора магнитного поля на площади 0.5 га до разминирования.

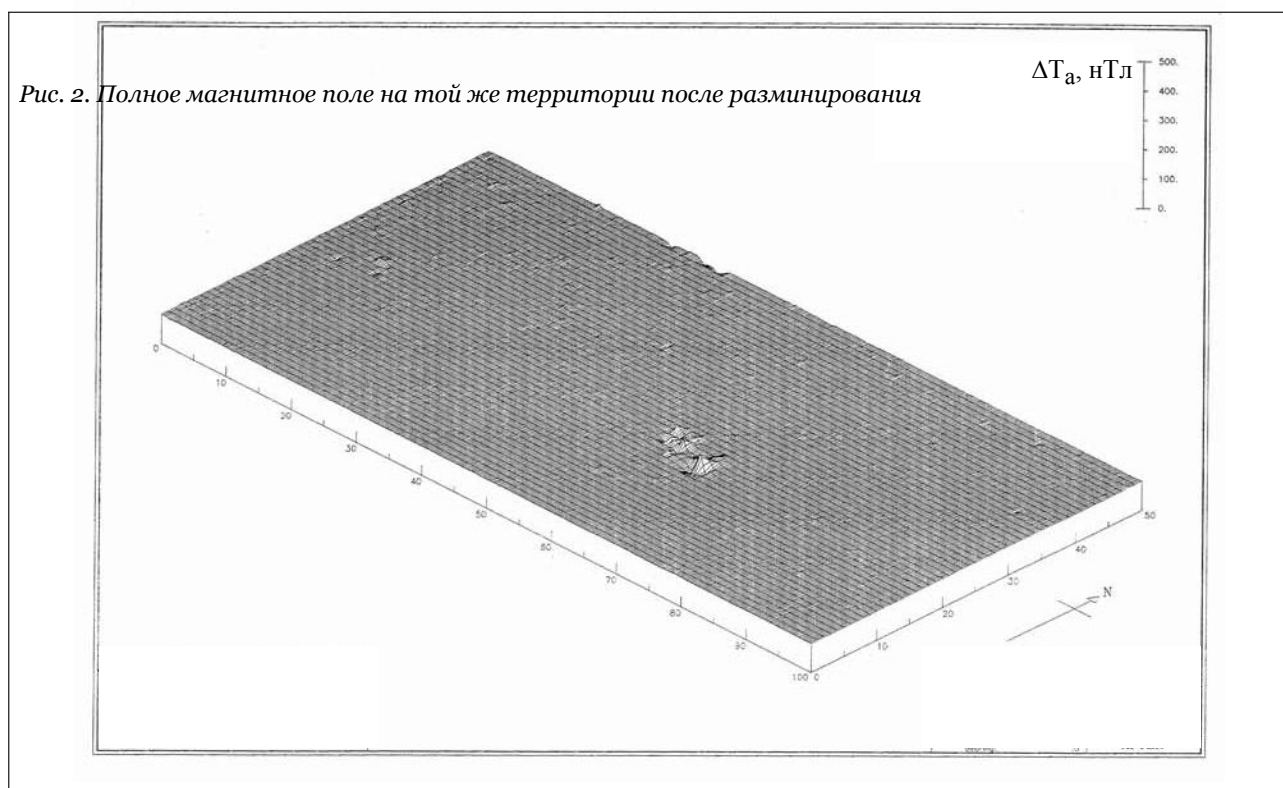


Рис. 2. Полное магнитное поле на той же территории после разминирования

Экологическая и инженерная геофизика

после устранения таких объектов. На рис. 2 видно, насколько качественно удалось зачистить участок, а также отмечается небольшой фрагмент, требующий повторного обследования.

Проверки на полигоне

В начале 1990-х Конгресс США проголосовал за зачистку от НРБП нескольких миллионов акров земли, находящейся или ранее находившейся в собственности правительства. В обществе с развитой судебной системой необходимо, прежде всего, установить текущий уровень развития техники для поиска НРБП и попытаться дать количественные оценки качества работ. Для этой цели постановлениями Конгресса №№ 2401 и 3116 начата Программа демонстрации передовых технологий (Advanced Technology Demonstration Program). За четыре года выделено 25 млн. долларов на опытные работы, которые проводились в основном на испытательном полигоне в районе г. Джефферсон в штате Индиана (Jefferson Proving Ground).

В ходе первых трех стадий этих испытаний вероятность обнаружения (определенная только для специально оборудованного полигона в районе г. Джефферсон) выросла с 62% в 1994 г. (только с использованием магнитометров) до 85% в 1995 г. и до 94% в 1996 г., когда была внедрена система обработки, объединяющая магнитные и электромагнитные данные. В большинстве случаев рост вероятности обнаружения достигнут без увеличения доли ложных срабатываний.

Всего испытано более 30 образцов. Магнитометры, измеряющие полный вектор поля, оказались наиболее эффективны для обнаружения глубоко залегающих железных объектов, а индукционные датчики – для поиска нежелезных объектов малого размера, залегающих на небольшой глубине. Эффективность магнитометров снижается при наличии в почве магнитных минералов; на некоторые типы индукционных датчиков эти минералы практически не влияют. Современным уровнем решения проблемы признано совместное применение магнитных и индукционных датчиков в сочетании с глубокой обработкой данных.

Доказательства для суда

Те, кто занимается поиском НРБП, с удовлетворением восприняли официальное признание того факта, что совершенной системы поиска не существует, и поэтому не следует ожидать стопроцентного обнаружения «до центра Земли». Тем не менее, следует использовать только признанные передовые методики, причем установленным порядком, обеспечивающим надлежащий контроль качества. Работы, проведенные по неадекватной или неоптимальной методике, могут быть забракованы. Такие требования являются более жесткими, чем принятые в нефтяной и других отраслях.

Признание невозможности стопроцентного обнаружения следует в основном из очевидного факта: очень маленькие объекты невозможно обнаружить на очень больших расстояниях (глубинах). Следует, однако, иметь возможность указать предельную

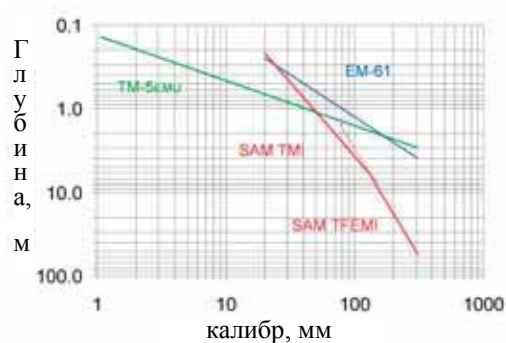


Рис. 3. Глубина обнаружения НРБП различного размера датчиками разных типов

глубину, на которой можно обнаружить объект данного размера (данный тип боеприпаса) с заданной вероятностью. Для этого нужно знать пределы изменения (связанного с ориентацией, конструкцией, коррозией и т. п.) откликов от боеприпасов каждого типа при различных характеристиках методики (интервал записи, тип и разрешающая способность аппаратуры, высота датчика над землей). Если удастся указать глубину, до которой возможно достоверное обнаружение, эту информацию можно применять для управления рисками, определения дальнейшего использования земель, или, при проведении земляных работ на большей глубине, для выработки безопасного способа работы. Для этих целей разработаны надежные процедуры.

На рис. 3 показана глубина, которая может быть достигнута при работе ведущими методиками поиска НРБП для различных типов боеприпасов. Из рисунка видно, что для электромагнитных датчиков Geonics EM-61, G-tek TM-5EMU и датчика становления поля G-tek, работающего на дозвуковых частотах (технология магнитометрии на дозвуковых частотах - Sub-Audio Magnetism – описана ниже) результат сравнительно слабо зависит от геологической обстановки. Для магнитных датчиков, измеряющих вектор полного поля, на латеритах и базальтах зависимость гораздо сильнее.



Слева: Индукционный миноискатель TM-5EMU при поиске НРБП в вулканических горах Алеутских островов.

Справа: ощутимые результаты разминирования

Экологическая и инженерная геофизика

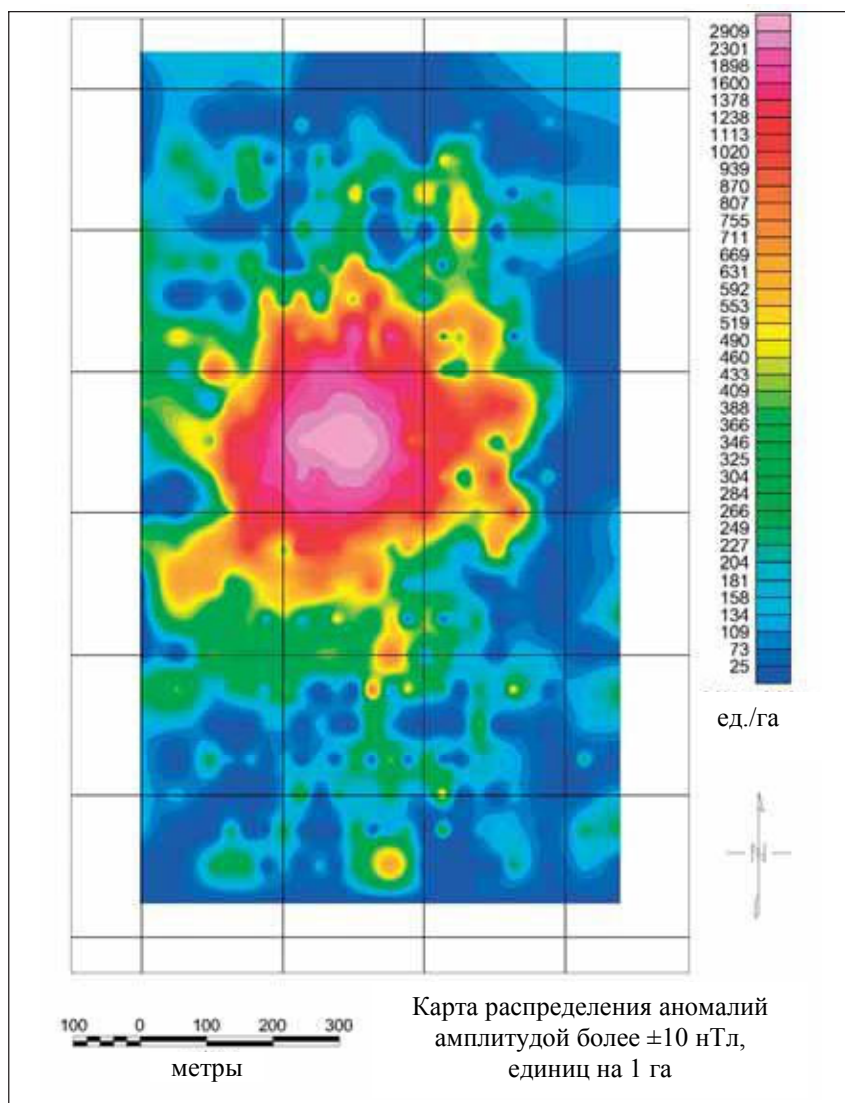


Рис. 4. Количество металлических предметов на гектар по территории площадью 40 га, содержащей мишень для учебного бомбометания. Интегрирование данных дает общее количество металлических предметов. Данные получены за один день бригадой из двух человек.

Современная практика

В сфере утилизации боеприпасов на общий ход работ и качество результатов сильно влияют несколько основных показателей. Традиционный подход состоит в планировании работ на основе предварительных оценок, поскольку обычно степень «заражения» невозможно установить до разминирования. Такой подход защищает подрядчика, но не отвечает интересам заказчика. В нем отсутствуют стимулы к углубленному пониманию геофизики для сокращения числа ложных целей. Компания, которой платят за показ мест, где копать, охотно будет применять методику, которая дает много таких мест!

В США, данные по которым наиболее доступны, обычно оказывается около 100 «промахов» на каждый обнаруженный боеприпас. Таким образом, при средней стоимости раскопок 200 долларов за точку (оценки штаба инженерных войск Армии США) стоимость утилизации одного неразорвавшегося боеприпаса составляет 20000 долларов.

Хотя так можно достичь высокого качества зачистки, затраты на раскопку ложных целей оказываются весьма тяжелыми, и структуры, ответственные за разминирование, активно ищут способы снизить число ложных целей.

Ныне складывается и альтернативный подход к организации работ по утилизации боеприпасов, который предусматривает «застрахованную сделку по твердой цене». Чтобы такая схема работала, подрядчик должен знать площадь поиска и распределение объектов еще до определения величины расходов до того, как эту цену примет страховая компания. В отрасли еще не сложилось полного понимания, как это сделать лучше всего. В настоящее время подрядчики должны за свой счет определять эти параметры площади поиска. Время и финансирование на нормальное проведение таких оценок не закладывается в проекты, поэтому стоимость страхования возрастает. Достойным внимания исключением является использование геофизических

Экологическая и инженерная геофизика

методов при обследовании участка на хребте Тракади (Tracadie) в районе Нью-Брунсуик (New Brunswick) в Канаде. Тогда по результатам систематических геофизических наблюдений, стоимость которых составляла несколько процентов общей суммы расходов, площадь работ и распределение объектов на участке в 18000 га удалось оценить с точностью более 90%.

Рис. 4 демонстрирует эффективность должного применения геофизических методов для оценки площади работ и количества объектов. На рисунке показано количество металлических предметов на гектар на территории площадью 40 га, на которой находится мишень для учебного бомбометания. Интегрирование этих данных дало общее количество предметов. Данные получены за один день бригадой из двух человек.

Предварительное геофизическое обследование и картирование необязательно проводить в рамках отдельного контракта (по крайней мере, на крупных участках, требующих разминирования), поскольку затраты на них мало зависят от типа объектов поиска или минерального состава грунта. Проведение в начале сравнительно простых опытных работ позволит установить, какие оборудование и методика лучше всего работают в условиях данного участка. Располагая геофизическими данными, можно получить ряд преимуществ. Стоимость работ по разминированию можно будет оценить точно, снизив тем самым расходы на страхование. Можно выделить участки, свободные от объектов поиска, продать их и обеспечить финансирование работ по разминированию остальной территории. По результатам геофизических работ можно оценивать риски до начала любых земляных работ, установив глубину, до которой можно с нужной точностью гарантировать обнаружение объектов.

Исключение ложных целей

При типичном количестве ложных целей около 100 на каждый обнаруженный боеприпас можно, очевидно, достичь существенного снижения затрат, если можно будет раскапывать только угрожающие объекты. Возможность отличать НРБП от других металлических предметов и особенностей геологического разреза открывает перспективы значительной экономии. Любая процедура различения добавляет, тем не менее, некоторый риск того, что какой-то НРБП будет пропущен. Как оценить этот риск? Как доказать властям, что экономия путем использования различающих методик служит интересам общества? Поиск ответа на эти вопросы – один из сегодняшних приоритетов.

Проблему различения можно рассматривать как три отдельных задачи. Ложные цели геологического происхождения наиболее неудобны, поскольку там нельзя найти металлического предмета, вызвавшего срабатывание датчика. Тем не менее, выделение геологических источников легко осуществить, применяя датчики двух разных типов, по-разному реагирующие на геологию. Выделение ложных целей геологического происхождения приемлемой комбинацией датчиков устойчиво и не должно волновать власти.



Восьмиканальная буксируемая сборка магнитометров при поисках НРБП на открытой местности (Южная Дакота).

Чаще всего встречаются ложные цели, связанные с осколками. На каждый НРБП приходится тысячи осколков. Главной особенностью, позволяющей отличать осколки, является их отличие от НРБП по размерам.

Такое различие может быть несколько рискованным, но риск может быть невелик и количественно оценен. Выделение осколков по размеру наиболее эффективно, если на территории применялись боеприпасы сравнительно большого размера.

Многолетние эксперименты в долине Хелена, проводимые Национальной гвардией штата Монтана дали весьма удовлетворительный результат – около пяти ложных целей на каждый НРБП. Независимые объективные оценки качества показали, что снижение числа ложных целей достигнуто без заметного увеличения риска. НРБП наименьшего размера на полигонах в Монтане представлены снарядами калибра 76 мм. Риск, связанный с применением различающих технологий, становится неприемлемо высок, когда нужно находить мелкие взрывоопасные предметы среди осколков гораздо более крупных боеприпасов.

Наиболее сложной является задача различения НРБП и неопасных предметов того же размера и формы. Недавние эксперименты показывают, что методика, разработанная в университете Британской Колумбии в Ванкувере, способна решить эту задачу для железных НРБП, которые вошли в землю при ударе и после этого не перемещались. Теория говорит, что после удара объект переманивается по направлению магнитного поля Земли, и в его намагниченности нет остаточной составляющей. Если упорядочить аномалии магнитного поля по величине остаточной намагниченности, необходимой для соответствия поля магнитной модели наблюдаемому полю, наибольшие ее значения будут соответствовать объектам, наиболее похожим на НРБП. Проверив наиболее похожие на НРБП объекты, далее возможно, по крайней мере, теоретически, обнаружив серию объектов, не соответствующих НРБП и располагая данными о количестве обнаруженных и оставшихся НРБП,

Экологическая и инженерная геофизика

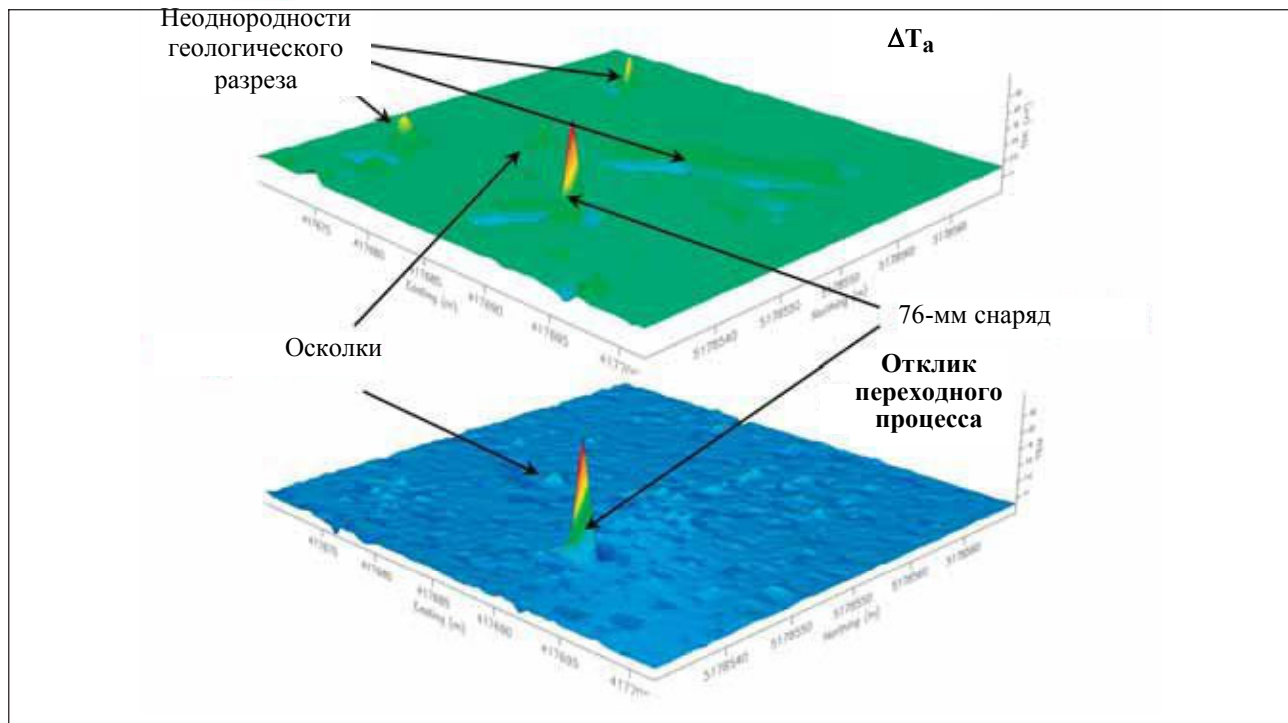


Рис. 5. Результаты одновременного измерения полного магнитного поля и поля переходного процесса на площади 30 x 30 м по методу ДЗМ. В магнитном поле видны аномалии, связанные с 76-мм снарядом, несколькими осколками и аномалии геологического происхождения, интерпретируемые как, возможно, НРБП или захоронение. Ниже показаны результаты записи переходного процесса. Совместная инверсия позволила распознать НРБП. Осколки также надежно определяются, а ложные цели геологического происхождения

устранены. оценить вероятность наличия НРБП. Применение этого метода в Монтане позволило вдвое уменьшить число ложных целей, не пропустив ни одного НРБП.

Новые технологии

Уровень затраты на раскапывание ложных целей, необходимость обеспечить безопасность населения и потребность в экономических методах разминирования составляют серьезный вызов для тех, кто разрабатывает соответствующие технологии. В некоторых местах власти требуют, чтобы, если, например, магнитный датчик обнаруживает 95% объектов, индукционный датчик обнаруживает тоже 95% объектов, а вместе они обнаруживают, скажем, 98% объектов, то применялись бы оба датчика – невзирая на затраты. Мы уже отмечали, что совместное применение магнитных и индукционных датчиков позволяет эффективно и без риска отбраковывать ложные цели геологического происхождения.

Не позволит ли совместная интерпретация (инверсия) данных магнитных и индукционных датчиков улучшить еще и выделение осколков? Есть основания полагать, что может. В ответ на потребность в эффективной многоканальной технике некоторые производители объединили в одном устройстве современные магнитные датчики полного поля и индукционные датчики, причем измерения полного вектора магнитного поля проводятся в промежутках между включениями индукционной системы.

Такие устройства получаются громоздкими и для работы с ними (буксировки по профилю) необходимы транспортные средства, поэтому их можно применять лишь на открытой местности. Возможно также последовательное проведение двух циклов наблюдений с переносной аппаратурой с разными датчиками. Но в таком случае не только удваивается стоимость работ, но и пространственное положение точек наблюдения в двух наборах данных не в точности одинаково, что резко снижает возможность применения совместной инверсии.

Новый метод, разработанный в Австралии группой, занимающейся внедрением цифровых технологий в утилизацию боеприпасов, позволяет одновременно измерять полный вектор магнитного поля и полный вектор электромагнитного поля во время переходного процесса, причем используется только магнитный датчик, что весьма удобно. Этот метод называется магниторазведка на дозвуковых частотах (Sub-Audio Magnetism – SAM; дозвуковая магниторазведка - ДЗМ). В ходе работ ДЗМ при поиске НРБП вокруг обследуемого участка раскладывается большая петля из кабеля в форме квадрата со стороной до 50 м. В петлю подается сигнал в форме меандра, частота подачи импульсов – 15 Гц в США или 25 Гц в других странах (в зависимости от принятой промышленной частоты), длина импульса – обычно ¼ цикла. Счетверенный датчик на базе квантового магнитометра («приемник» ДЗМ), синхронизированный с питающим контуром по времени GPS, выдает 1200 (при

Экологическая и инженерная геофизика

необходимости – до 9600) отсчетов в секунду с точностью 0.02 нТл. По измеренным данным можно установить пространственное распределение как полного вектора магнитного поля, так и кривых спада становления поля.

Эффективность ДЗМ продемонстрирована в ходе полевых экспериментов, результаты которых представлены на рис. 5. Вверху показаны аномалии полного магнитного поля, связанные с 76-мм снарядом, несколькими осколками и аномалиями геологического происхождения, которые можно интерпретировать, в том числе, как НРБП или как захоронение. На нижнем рисунке показаны результаты анализа переходного процесса. Совместная инверсия этих данных позволила выделить НРБП, а также уверенно отличить их от осколков и исключить ложные цели геологического происхождения.

Еще одно достоинство ДЗМ – возможность обнаружения крупных НРБП на глубинах, далеко превосходящих все возможности индукционных датчиков миноискателей и даже магнитометров в самых благоприятных условиях. Этот результат показан на рис. 3. Говоря простым математическим языком, отклик индукционного датчика с ростом глубины h до объекта убывает как h^{-5} – h^{-6} , а совместный отклик магнитометра и датчика становления поля – как h^{-2} – h^{-3} , при этом датчик становления поля сравнительно мало подвержен влиянию геологического строения и не зависит от остаточной намагниченности.

В настоящее время идут широкие «клинические испытания» применения ДЗМ при поиске НРБП, финансируемые в рамках американской Программы сертификации природоохранных технологий (Environmental Security Technology Certification Program – ESTCP). В рамках Программы технической защиты окружающей среды (Environmental Quality Technology program – EQT) Научно исследовательскому центру Инженерных войск (Engineer Research and Development Center – ERDC) Армии США выделены средства на разработку магнитометра, пригодного для работ ДЗМ. Промышленное применение метода ДЗМ при поиске НРБП планируется начать в 2005 г. по завершении испытаний в рамках программы ESTCP.

Литература

Office of the US Under Secretary of Defense for Acquisition, Technology and Logistics, D.C. [2003] *Report of the Defense Science Board Task Force on Unexploded Ordnance*. November 2003.
Leduc, F. and Stratton, P. [1997]. The Results of an Innovative Assessment Strategy Tracadie Range, New Brunswick, Canada. *Proceedings UXO Forum 1997*, Nashville, Tennessee.
Stanley, J.M. [1996]. The Technology and Methodology for EOD Site Assessment. *Proceedings UXO Forum 1996*, 166-175, Williamsburg, Virginia.
Youmans, C. [2002] Assessment of OE Contamination Based on Grid Sampling in the Limestone Hills, Montana. *Proceedings UXO Forum 2002*, Orlando, Florida.

Billings, S. D., Stanley, J. M. and Youmans, C. [2002] Magnetic Discrimination that will Satisfy Regulators? *Proceedings UXO Forum 2002*, Orlando, Florida.
Cattach, M.K., Stanley, J.M., Lee, S. J. and Boyd, G.W. [1993] Sub-Audio Magnetism (SAM). A High Resolution Technique for Simultaneously Mapping Electrical and Magnetic Properties. *Exploration Geophysics*, **24**, 387-400. Stanley, J.M., Cattach, M.K., Griffin, S. M. and Helms, L. (2004). 'Sub-Audio Magnetism. Case Studies in Simultaneous Magnetic and Electromagnetic Detection of UXO'. *Proceedings UXO Forum 2004*, St Louis, Missouri.