

УДК 550.837.6 : 681.324

© Е.В. Балков, А.А. Адайкин

*Е.В. Балков, А.А. Адайкин*

# УПРАВЛЕНИЕ АППАРАТУРОЙ ЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ КАРМАННОГО КОМПЬЮТЕРА

## Введение

В настоящее время в мировой геофизической практике широко используются приборы для малоглубинных исследований земли (первые метры или десятки метров). В Институте нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (г. Новосибирск) ведется разработка аппаратурно-программного комплекса индукционного частотного электромагнитного зондирования (ЭМС). Наземный портативный комплекс ЭМС предназначен для дистанционного исследования объемного распределения удельной электропроводности верхнего слоя земли на глубинах до 10 метров.

Оперативная обработка данных непосредственно во время полевых измерений существенно повышает эффективность применения аппаратуры. Возможности современных карманных персональ-

ных компьютеров (КПК) позволяют решать задачи предварительной обработки, визуализации данных и синхронизации с GPS в реальном времени.

Наличие программной поддержки является необходимым условием для эксплуатации и внедрения аппаратуры ЭМС в качестве аппаратурно-программного комплекса частотного электромагнитного зондирования (ЧЭЗ), а также способствует запуску серийного производства аппаратуры.

## Принцип работы и области применения

Аппаратура ЭМС реализует метод индукционного частотного электромагнитного зондирования и представляет собой трехкатушечный зонд [1]. Схема расположения катушек приведена на рис. 1. Генераторный контур излучает электромагнитное поле на 14 частотах в диапазоне от 2,5 кГц до 250 кГц. Аппаратурой измеряются квадратурная и синфазная



Рис. 1. Аппаратурно-программный комплекс ЭМС: схема прибора, управляющая программа на КПК и беспроводной GPS приемник, пример полевых работ

составляющие разностной э.д.с., индуцированной вихревыми токами, текущими в среде.

ЭМС является автономным прибором с внутренним источником питания и постоянным запоминающим устройством. Корпус изготовлен из стеклопластика. Общая длина зонда в рабочем состоянии 2,75 м, в транспортном положении – 1,4 м. Масса не превышает 10 кг. На генераторной части корпуса расположены клавиатура и жидкокристаллический монитор. Среднее время одного зондирования на всех 14 частотах составляет 2 секунды.

Из основных областей применения аппаратуры ЭМС можно выделить:

- археологические исследования, поиски объектов культурного наследия [2];
- экологический мониторинг загрязнения грунтовых вод;
- изучение подземных туннелей и пустот, поиск подземных сооружений и коммуникаций;
- поиск источников соленой и пресной воды;
- обнаружение и локализация захоронений промышленных отходов;
- обнаружение неразрывавшихся боеприпасов.

Эти задачи аппаратура ЭМС позволяет решать дистанционно без нарушения поверхностного слоя (например, дорожного покрытия).

Для управления основными режимами работы аппаратуры ЭМС разработано специализированное программное обеспечение (ПО) *EmsControl* для платформы КПК [3]. ПО позволяет обрабатывать данные полевых зондирований, представлять результаты обработки в удобном для пользователя графическом виде в режиме реального времени и сохранять результаты. *EmsControl* дает оператору возможность в процессе полевых работ строить карты распределения удельного электрического сопротивления (УЭС) и псевдо-геоэлектрические разрезы. Кроме того, в ПО включена возможность использования GPS приемника (внешнего или встроенного в КПК) для определения координат точек зондирования, без предварительной разбивки координатной сетки по рулеткам. Это значительно экономит временные ресурсы, необходимые для проведения полевых работ.

Для передачи данных измерительный комплекс ЭМС оснащен модулем беспроводной радиосвязи стандарта Bluetooth™. Таким образом, управление аппаратурой с КПК и передача данных осуществляется по беспроводному каналу. Отсутствие дополнительных проводов во время полевых работ упрощает эксплуатацию аппаратуры.

### Обзор мировых достижений

На сегодняшний день ЭМС не имеет прямых аналогов на мировом рынке. По сравнению с самыми

близкими аналогами ведущих производителей портативной электромагнитной аппаратуры, например Geophex (аппаратура GEM-2), Geonics (приборы EM-31, EM-38) и GSSI (аппаратура Profiler), ЭМС имеет ряд преимуществ [4]. В отличие от продукции Geonics, ЭМС использует несколько рабочих частот. Это позволяет получать информацию об изменении свойств грунта в зависимости от глубины. По сравнению с GEM-2 и Profiler ЭМС имеет более широкий диапазон частот, что значительно увеличивает область применения аппаратуры. Кроме того, благодаря использованию компенсационной схемы измерения, ЭМС имеет большую локальность измерения, что повышает разрешающую способность. К числу преимуществ аппаратуры ЭМС также можно отнести большую устойчивость к электромагнитным помехам.

Следует отметить, что большинство зарубежных производителей предоставляют возможность только пост-обработки данных зондирования (профилирования) и GPS координат на персональных компьютерах, используя для передачи данных стандартный порт RS-232. Geonics позволяют управлять аппаратурой с помощью карманного компьютера через RS-232. GSSI для передачи данных использует беспроводной канал. На сегодняшний день на мировом рынке отсутствуют портативные наземные электромагнитные аппаратурно-программные комплексы, обладающие возможностями, обеспеченными ПО *EmsControl*.

### Обработка данных

Для предварительной обработки данных принято использовать модель однородного проводящего полупространства и в результате получать кажущиеся значения УЭС. Ниже приведена формула для расчета электродвижущей силы, индуцированной в приемниках аппаратуры ЭМС на поверхности полупространства [1]:

$$\varepsilon_j = -i\omega\mu_0 \frac{M_j M_t}{4\pi r_j^3} \left\{ \frac{2}{k^2 r_j^2} \left[ 9 - (9 + kr_j + 4k^2 r_j^2 + k^3 r_j^3) e^{-kr_j} \right] \right\},$$

$$j = 1, 2.$$

Здесь  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота,  $k = \sqrt{i\omega\mu_0\sigma}$  – волновое число среды,  $\sigma$  – электропроводность среды,  $M_j$  и  $M_t$  – моменты приемников и генератора соответственно,  $r$  – расстояние между ними,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная проницаемость вакуума.

Графики зависимости модуля разностной э.д.с. ( $\varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1$ ) от УЭС полупространства приведены на рис. 2а. Зависимость измеряемого сигнала от УЭС среды не является линейной. Таким образом, для нахождения значений сопротивления необходимо решать трансцендентное уравнение в выделенном

промежутке монотонности для каждой частоты. Эта задача требует «отвлечения» дополнительных вычислительных ресурсов КПК. Однако существует низкочастотное приближение, позволяющее с определенной точностью производить обработку линейного порядка.

Выражение для  $\epsilon_j$  легко раскладывается в ряд при малых значениях параметра  $kr$  ( $|kr| \ll 1$ ):

$$\epsilon_j \approx -i\omega\mu_0 \frac{M_j M_T}{4\pi r_j^3} \left\{ 1 + \frac{ip_j^2}{4} - \frac{(4i-4)p_j^3}{15\sqrt{2}} + \frac{p_j^4}{8} + O(p_j^5) \right\},$$

где  $p_j = r_j \sqrt{\omega\mu_0\sigma}$ ,  $j = 1, 2$ .

Покомпонентные выражения э.д.с. имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{Re}(\epsilon_j) &\approx \omega\mu_0 \frac{M_j M_T}{4\pi r_j^3} \left\{ \frac{p_j^2}{4} - \frac{4p_j^3}{15\sqrt{2}} + O(p_j^5) \right\}, \\ \text{Im}(\epsilon_j) &\approx \omega\mu_0 \frac{M_j M_T}{4\pi r_j^3} \left\{ -1 - \frac{4p_j^3}{15\sqrt{2}} + \frac{p_j^4}{8} + O(p_j^5) \right\}. \end{aligned}$$

Старший член разложения для реальной компоненты сигнала прямо пропорционален проводимости полупространства. Разложение мнимой компоненты содержит в себе слагаемые, соответствующие прямому полю генератора. Это поле достаточно глубоко компенсируется специально подобранной конфигурацией приемных антенн, однако содержит в себе ошибки недокомпенсации, делая реальную компоненту более предпочтительной к обработке. Модуль сигнала обеспечивает исключение учета фазы сигнала. Таким образом, рекомендуемыми к обработке являются модуль и реальная компонента э.д.с.

Выпишем окончательные выражения для расчета приближенной разностной э.д.с., учитывая только первые члены разложений:

$$\begin{aligned} \text{Re}(\epsilon) &\approx \frac{\omega^2 \mu_0^2}{16} (r_T^2 n_T) \left\{ \frac{M_2}{r_2} - \frac{M_1}{r_1} \right\} \sigma, \\ \text{Im}(\epsilon) &\approx \frac{\omega^{5/2} \mu_0^{5/2} (r_T^2 n_T)}{15\sqrt{2}} (M_2 - M_1) \sigma^{3/2}, \\ |\epsilon|^2 &\approx \frac{\omega^2 \mu_0^2}{16} (r_T^2 n_T) \left\{ \frac{M_2}{r_2} - \frac{M_1}{r_1} \right\} \sigma^2 + \\ &+ \frac{\omega^{5/2} \mu_0^{5/2} (r_T^2 n_T)}{15\sqrt{2}} (M_2 - M_1) \sigma^3. \end{aligned}$$

В работе [5] были получены оценки границ применения низкочастотного приближения для аппаратуры ЭМС. На диаграммах рис. 2б приведены минимальные значения сопротивления для различных частот, при которых погрешность не превышает заданных значений. Анализ границ применения показывает, что рассматриваемое приближение может быть использовано для предварительной и быстрой обработки на КПК с приемлемой точностью.

### Визуализация данных

Программное обеспечение на базе платформы КПК представляет собой оконное приложение диалоговой структуры с удобным интерфейсом управления и визуализацией данных аппаратуры ЭМС. Программа поддерживает несколько режимов работы с аппаратурой ЭМС. Измерения могут проводиться по

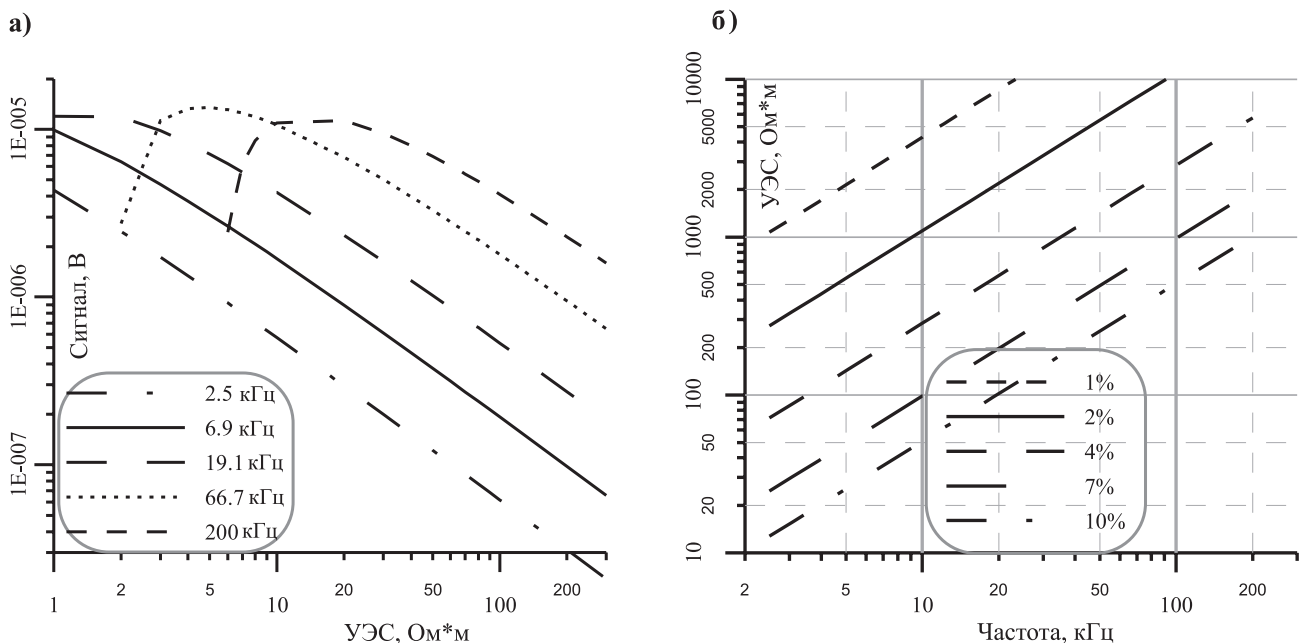


Рис. 2. Моделирование сигналов от однородного полупространства для аппаратуры ЭМС:  
 а) модуль разностной э.д.с. в зависимости от УЭС полупространства для набора рабочих частот;  
 б) область применимости низкочастотного приближения

предварительно заданной координатной сетке и по хаотической сетке на основе GPS данным для определения абсолютных координат зондирований.

Программное обеспечение позволяет оперативно строить карты, разрезы и диаграммы сигнала или УЭС в реальном времени. При отображении используется заданная палитра цветов и соответствующий ей диапазон значений сигнала. При построении карт распределения кажущейся электропроводности для случая измерений по координатной сетке используется алгоритм билинейной интерполяции данных измерений. Это наиболее простой и производительный метод, что является важным критерием для подобного рода задач в условиях ограниченности вычислительных ресурсов. Так, на КПК с тактовой частотой процессора 266 МГц картинка размером примерно в 70 000 пикселей строится меньше 500 мс. Этого вполне достаточно для практических целей, так как время одного измерения составляет 2 секунды.

Аппаратура ЭМС предоставляет возможность проводить зондирования на нескольких частотах, позволяя получать информацию об изменении среды на разных глубинах и строить геоэлектрические разрезы. Кажущаяся глубина зондирования обратно пропорциональна корню из частоты. Нормировочный коэффициент для определения глубины в метрах зависит от свойств почвы, подбирается эмпирически и задается оператором.

#### Синхронизация с GPS данными

Применение устройств GPS для определения абсолютных координат зондирований существенно сокращает временные ресурсы, необходимые для проведения полевых работ. Измерения могут проводиться в непрерывном режиме в произвольных точках. Для определения координат используется GPS приемник, встроенный в КПК, либо внешний, беспроводной.

Перед началом измерения аппаратурный комплекс ЭМС переводит встроенный Bluetooth™ модуль в режим мастера соединений и производит поиск окружающих терминалов с активным Bluetooth™ модулем. После этого производится соединение с выбранным КПК, на котором установлено соответствующее программное обеспечение для контроля аппаратуры. КПК в качестве мастера инициирует Bluetooth™ соединение с GPS приемником, при этом одновременно обмениваясь данными с двумя устройствами.

Для режима измерения с GPS в реальном времени отображается не только сигнал, но и GPS трек. При этом абсолютные координаты (широта и долгота), получаемые от GPS приемника, переводятся в локальные, относительно координат первого измерения.

Программное обеспечение производит линейную экстраполяцию широты и долготы последних точек зондирований для защиты от нестабильного приема GPS данных. Затем получившиеся координаты еще раз корректируются линейной интерполяцией между ближайшими по времени GPS координатами. Например GPS приемник определяет координаты 1 раз в секунду, зондирования ведутся каждые 0,5 секунды. Приняв начало измерений за нулевую точку отсчета, координаты четвертого измерения в момент времени  $t = 1,5$  сек. будут рассчитаны экстраполяцией предыдущих значений, а в момент времени  $t = 2,0$  сек. будут скорректированы с учетом последних GPS данных.

#### Примеры применения комплекса ЭМС

Большой объем полевых работ был выполнен в Ханты-Мансийском автономном округе. Исследования проводились на территории строящегося горнолыжного комплекса со сложным рельефом естественного и искусственного происхождения.

В целях анализа риска оползней участка (50×250 м<sup>2</sup>) горнолыжной трассы, изучалась обводненность глинистого горизонта, залегающего под слоем песчанистого грунта и насыпного песка. Области пониженного сопротивления соответствуют наиболее обводненным областям и могут быть отнесены к зонам риска. Рис. 3а демонстрирует оперативную информацию, которая была доступна оператору на КПК во время полевых работ. На рис. 3б показана карта распределения кажущегося УЭС, судя по которой середина участка обладает повышенным сопротивлением, а значит более сухая (за исключением локальных обводненных участков). Точками отмечены пикеты, на которых проводилось зондирование. Работы выполнялись в режиме управления КПК при синхронизации с GPS координатами. Это сократило продолжительность работ с 8 до 1,5 часов, по сравнению с традиционной разбивкой участка на пикеты с помощью рулеток.

На территории того же комплекса был изучен участок насыпи трамплина «Халфпайп и Бигэйр». Требовалось немедленное создание дренажной системы для отвода воды и прекращения разрушения, вызванного грунтовыми водами. С помощью комплекса ЭМС была проведена площадная съемка. На рис. 4 приведена система наблюдений и карта распределения УЭС на частоте 12 кГц, наложенная на рельеф. Область повышенной обводненности, соответствующая низким значениям сопротивления расположена в Юго-Восточной части участка. После проведения электроразведочных работ были пробурены скважины. Пять скважин обнаружили воду. Сопоставление карт распределения УЭС и геоэлектрических разрезов

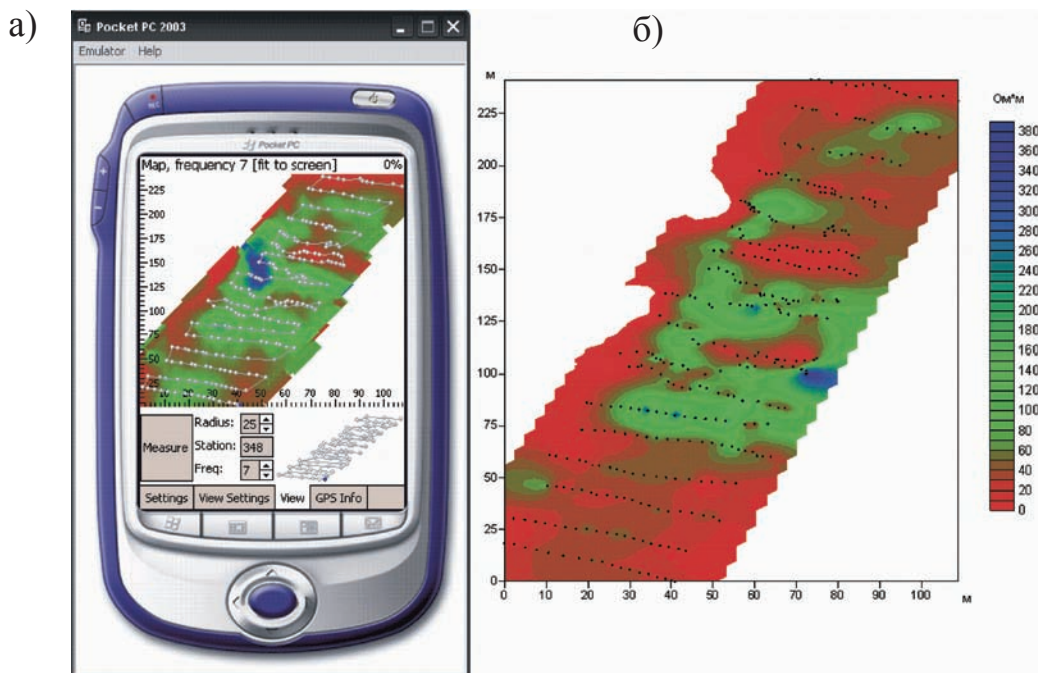


Рис. 3. Слева – эмулятор платформы Pocket PC 2003, демонстрирующий карту распределения сигнала, справа – обработанная карта распределения УЭС, указывающая на зоны риска оползней

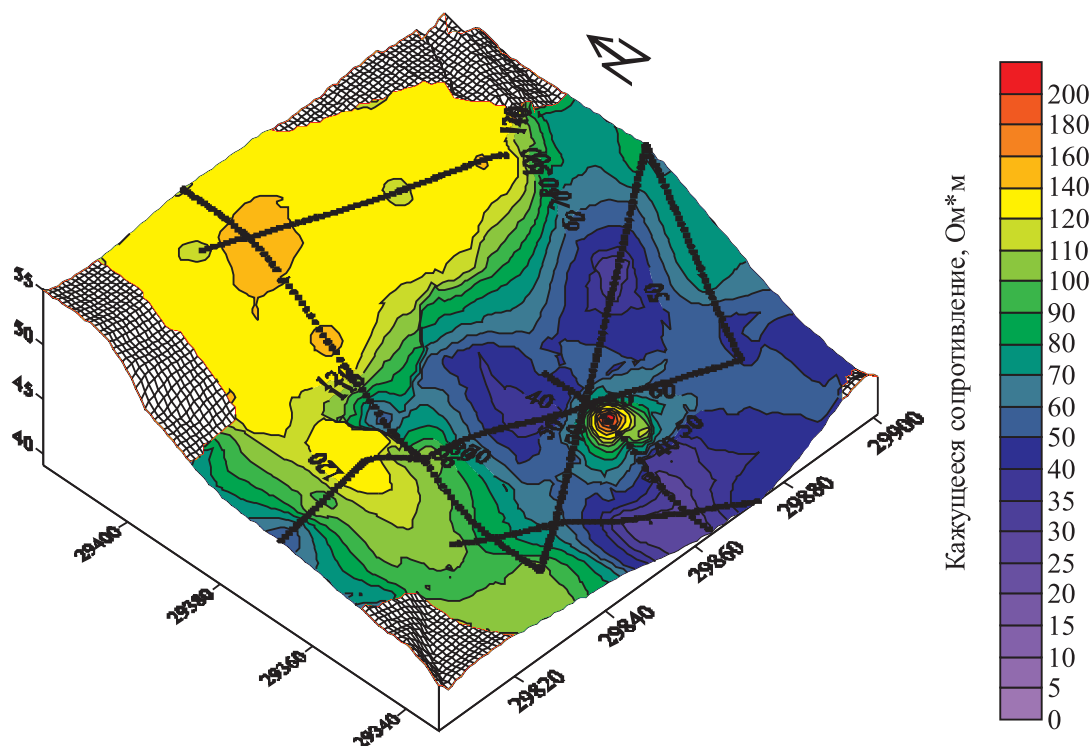


Рис. 4. Рельеф участка, координаты пунктов зондирования и карта распределения УЭС, выявляющая участки повышенной обводненности (система координат местная, координаты в метрах)

с картами геологических данных скважин показывает хорошее сходство результатов.

Программно-аппаратурным комплексом ЭМС в начале февраля 2006 г. были выполнены комплексные исследования на части площади кальдеры вулкана в окрестностях города Латера (провинция Лацио, Италия). На ровной площади в несколько гектар на некоторых местах отсутствует травяной покров. Это

вызвано проявлениями геотермальных газов. Измерения проводились в режиме управления КПК при синхронизации с GPS в непрерывном движении на 4 частотах со скоростью около 5 км/ч. По результатам исследования было изучено распределение УЭС. На карте, построенной по данным частоты 27 кГц (см. рис. 5), выявляются зоны повышенной проводимости, которые соответствуют местам выхода газа

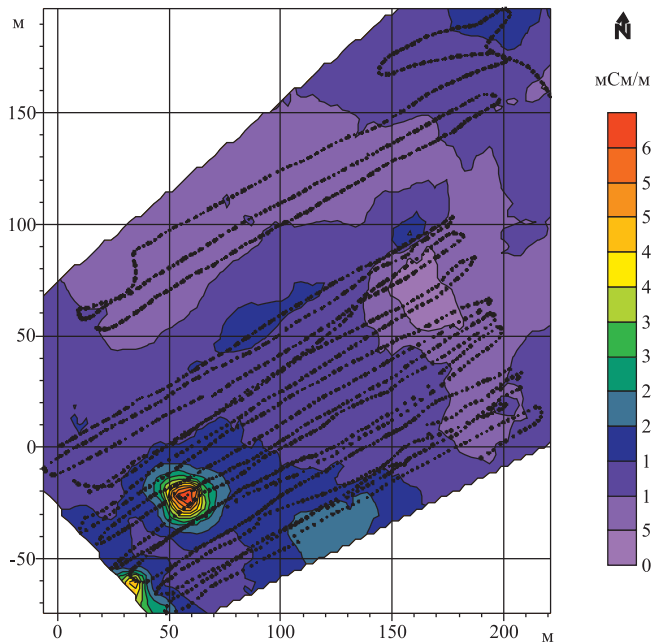


Рис. 5. Карта распределения кажущейся электропроводности по измерениям на нерегулярной сетке (координаты пунктов зондирования получены GPS навигатором и обозначены точками), демонстрирующая места с повышенной концентрацией  $\text{CO}_2$

$\text{CO}_2$  на поверхность. В юго-западном углу на поверхности грунта видна яркая аномалия, где полностью отсутствует растительность. Видна на поверхности грунта невооруженным глазом и характеризуется полным отсутствием растительности. Остальные аномальные области на поверхности почвы обнаруживаются только по геофизическим данным.

Следует отметить, что полученные аппаратурой ЭМС количественные данные хорошо коррелируют с данными, полученными двумерной томографией на постоянном токе (аппаратура *Iris Syscal*) и электромагнитным профилированием (аппаратура EM-31 фирмы Geonics).

### Заключение

Многолетний опыт использования геофизической аппаратуры частотного электромагнитного зондирования ЭМС показывает высокую эффективность применения аппаратуры для решения широкого круга инженерных, археологических и экологических задач.

Применение КПК в качестве беспроводного полевого контроллера для обработки, визуализации данных и синхронизации с GPS в реальном времени позволяет существенно повысить эффективность применения комплекса. Во-первых, при синхронизации с GPS в несколько раз возрастает скорость сбора данных по сравнению с традиционной предварительной разбивкой на пикеты. Во-вторых, получение результата в реальном времени дает возможность

оператору быстро оценивать ситуацию, принимать решения по корректировке сетки наблюдений, изменению направления движения или окончанию работ. В-третьих, отображение статической и динамической информации о системе наблюдений уменьшает вероятность ошибки позиционирования и повышает качество полевого материала. Программное обеспечение *EmsControl* прошло тестирование и успешную апробацию в большом количестве полевых работ. В дальнейшем ПО *EmsControl* может быть адаптировано для сбора и визуализации данных другой аппаратуры.

### Благодарности

Авторы благодарят коллектив группы Малоглубинной геофизики лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН за оказанное содействие в подготовке настоящей работы, а также за предоставленный полевой материал.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 06-06-80295-а) и Президиумом СО РАН (интеграционный проект № 109).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Балков Е.В. Трехкатушечный зонд в индукционном зондировании / Е.В. Балков, А.К. Манштейн // Геофизический вестник. – 2001. – № 12. – С. 17-20.
2. Балков Е.В. Опыт применения электромагнитного частотного зондирования для решения археолого-геофизических задач / Е.В. Балков, А.К. Манштейн, М.А. Чемякина, Ю.А. Манштейн, М.И. Эпов // Геофизика. – 2006. – № 1. – С. 43-50.
3. Адайкин А.А. Система управления аппаратурно-программного комплекса малоглубинного частотного электромагнитного зондирования / А.А. Адайкин, Е.В. Балков, А.К. Манштейн, М.М. Лаврентьев // Труды Международной конференции GraphiCon, 2006, Новосибирск. – С. 4.
4. Manstein Y. Electromagnetic multifrequency sounding device EMS, prototype 2. Comparison with commercial tools / Y. Manstein, A. Manstein, G. Morelli, N. Abu Zeid, G. Santarato // Geophysical Research Abstracts / European Geophysical Society. – 2003. – Vol. 5. – P. 00208. – ISSN 1029-7006.
5. Балков Е.В., Манштейн А.К. Сравнение характеристик двухкатушечной и трехкатушечной реализации индукционных зондов для малоглубинного частотного зондирования / Е.В. Балков, А.К. Манштейн // Геофизический вестник. – 2006. – № 1. – С. 12-17.