

**Симаков А.Е.<sup>(1)</sup>, Каминский А.Е.<sup>(2)</sup>, Сараев А.К.<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup> Санкт-Петербургский Государственный Университет

<sup>(2)</sup> СК "ГеофизПоиск"

## **ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОМАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

*В статье рассмотрены возможности радиоманнитотеллурического метода (PMT) для решения разнообразных инженерно-геофизических задач. Сделана попытка оценить возможности предлагаемого аппаратно-методического комплекса при выделении различных типов инженерно-геологических объектов. Проведено сопоставление результатов PMT с другими современными геофизическими методами, такими как электротомография.*

*Полевые измерения проводились с использованием аппаратного комплекса RMT-F, разработанного сотрудниками СПбГУ, совместно со специалистами компании «Микрокор» (Санкт-Петербург, Россия). Для интерпретации данных использовался пакет программ ZondMT (Санкт-Петербург, Россия).*

### **Введение**

Радиоманнитотеллурический метод основан на изучении электромагнитных полей удалённых широкоэмиттерных и специальных радиостанций сверхдлинноволнового (СДВ) 10 - 30 кГц, длинноволнового 30 - 300 кГц и средневолнового 300 - 1000 кГц диапазонов.

Методы, предшествующие PMT, такие как: метод радиокип [Гордеев С.Г., 1981 г.], СДВ, РЭМП [Яковлев А.В., 1987 г.] или их зарубежные аналоги (VLF, VLF-R) [Bastani, 2001 г., McNeil, 1991 г., Pedersen, 2006 г.] начали интенсивно развиваться в 60-х годах прошлого века. Исследовательские работы во всём мире были направлены на расширение частотного диапазона, используемого методами. Результатом этих работ явилось создание метода PMT. В 2002-2005 годах в рамках проекта ЕС "Copernicus" группой европейских университетов, в число которых входил СПбГУ, была разработана цифровая широкополосная аппаратура PMT метода [Tezkan, 2006 г.] и методика обработки и интерпретации данных, позволяющая проводить исследования в диапазоне частот 10-1000 кГц.

В диапазоне частот 10-1000 кГц имеется возможность исследовать геоэлектрический разрез на глубину от 1-2 м до 100 м. (глубинность исследования зависит от величины удельного сопротивления пород). Наибольшая глубина изучения разреза

обеспечивается при использовании полей СДВ радиостанций. Благоприятными условиями для применения метода РМТ при изучении коренных пород являются высокое удельное электрическое сопротивление и малая мощность рыхлых перекрывающих отложений. При повышенных значениях удельного сопротивления пород достигается наибольшая глубина изучения разреза. В районах распространения пород низкого удельного сопротивления метод обладает малой глубиной изучения разреза.

Первичное поле удаленной радиостанции представляет собою линейно поляризованную волну, в которой на границе раздела земля-воздух наблюдается ортогональность горизонтальных составляющих электрического и магнитного полей. На удалении от радиостанции в десятки километров измеряемый поверхностный импеданс совпадает с импедансом плоской вертикально падающей волны, который зависит только от строения и свойств нижележащего полупространства. Для данной модели поля детально разработаны различные алгоритмы интерпретации, обеспечивающие получение надежных результатов, реализованные в пакете ZondMT.



Рисунок 1. Внешний вид регистратора аппаратуры RMT-F

Четырехканальная аппаратура RMT-F (Рис. 1), предназначена для проведения пешеходной съемки методом радиоманнитотеллурического зондирования и профилирования [Tezkan, 2008 г.]. Аппаратура имеет четыре канала синхронных измерений с 16 разрядными АЦП в каждом канале, частотный диапазон 10-1000 кГц, объем встроенной памяти 2048 Мб, дисплей и клавиатуру для автономной работы без внешнего компьютера, канал Ethernet для связи с внешним компьютером и GPS приемник для привязки по координатам и времени. При работе производится регистрация временных рядов или спектрограмм сигналов магнитного и электрического полей и вычисление кажущегося сопротивления и фазы импеданса непосредственно в измерительном блоке с записью данных во встроенную память. Измерения электрического поля производятся с заземляемыми или бесконтактными приемными линиями, что дает возможность выполнения работ в летнее и зимнее время, а также в условиях, неблагоприятных для заземления электрических линий (асфальт, бетон, гравий).

Пакет программ ZondMT предназначена для одномерной и двумерной интерпретации профильных данных магнитотеллурических зондирований в диапазонах частот МТ, АМТ и РМТ. Удобный интерфейс и широкие возможности представления данных позволяют максимально эффективно решить поставленную геологическую задачу. При разработке программы особое внимание уделено удобству и простоте ее использования, разнообразию средств визуализации и учету априорной информации.

В зависимости от представлений интерпретатора о характере геоэлектрического разреза, программа предоставляет пользователю широкий выбор алгоритмов интерпретации данных. Удобная система управления позволяет пользователю выбрать из множества эквивалентных решений то, которое окажется наилучшим как с геофизической, так и с геологической точки зрения.

В программе предусмотрены специальные алгоритмы, предназначенные для профильной интерпретации магнитотеллурических данных, с подавлением Р-эффекта кривой.

При разработке программы особое внимание уделено учету априорной информации. Ввиду эквивалентности обратных геофизических задач, качество получаемых результатов напрямую зависит от количества используемых априорных данных. В ZondMT имеется возможность назначения весов измерениям, закрепления и задания пределов изменения параметров модели, использования априорной модели, как опорной при инверсии. Кроме этого в программе реализованы робастные схемы оценки шумовой составляющей. Также имеется возможность импортировать и отображать результаты измерений другими методами и скважинных данных, что способствует более комплексному подходу к интерпретации данных.

### **Опыт применения аппаратуры РМТ и средств обработки данных при исследованиях объектов различного типа**

#### **Исследование свалок промышленных и бытовых отходов**

Первым объектом исследований была свалка бытовых отходов расположенная в центре Испании, недалеко от Мадрида. Тело объекта представлено бытовыми отходами и перекрыто слоем суглинков и супесей мощностью порядка 1 м. К моменту исследований свалка не функционировала около 5 лет.

В круг решаемых задач входили: картирование захоронений, исследование их мощности, поиск возможных утечек загрязняющих веществ. В связи с наличием старых

свалок, документация к которым утеряна, эти работы представляются достаточно актуальными [Bastani, 2001 г.].

В ходе подготовительных работ было установлено, что пригодными для обработки (по уровню сигнала и по азимуту расположения относительно приёмных антенн аппаратуры PMT) являются примерно 30 радиостанций, что вполне достаточно, для использования полученных данных в программах интерпретации.

В результате интерпретации было установлено, что бытовые отходы хорошо выделяются на фоне вмещающих пород (глин различного типа) и отличаются пониженными значениями кажущегося удельного сопротивления (3-5 ом·м на фоне сопротивлений 15-30 ом·м, характерных для коренных пород) (Рис.2). Ввиду того, что удельное сопротивление тела свалки было относительно низким, определение нижней

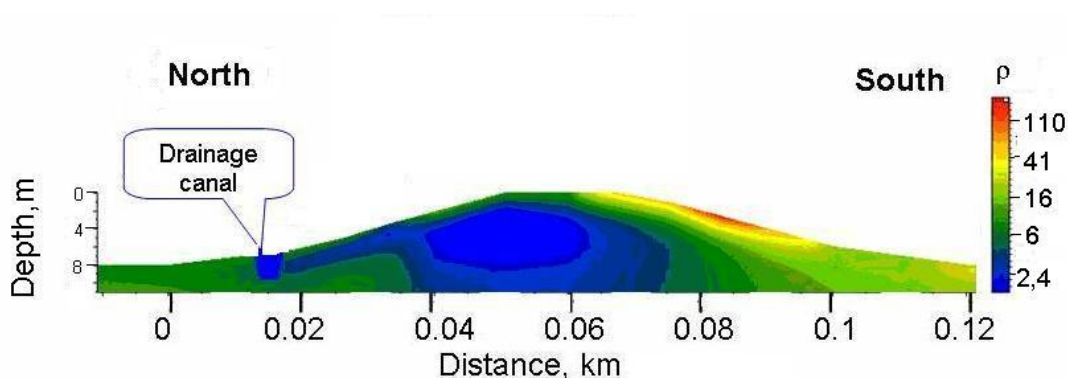


Рисунок 2. Результаты 2D инверсии вдоль одного из профилей на свалке бытовых отходов.

границы залегания отходов, а следовательно, и их мощности было затруднительно. В то же время мощность перекрывающих отложений (верхняя граница слоя бытовых отходов) определялась довольно уверенно, и такие результаты согласовывались с имеющейся априорной информацией.

Второй объект располагался в северной части Испании и представлял собой захоронение продуктов сгорания угля на местной ТЭЦ. Объект является естественным каньоном размером примерно 100x120 м, находящийся в кристаллических горных породах. Каньон заполнен угольными шлаками, перекрытыми сверху тонким (несколько сантиметров) слоем почвы. Мощность шлакового слоя непостоянна и увеличивается в направлении устья каньона, достигая десятков метров.

В ходе работ было установлено, что угольные шлаки характеризуются значениями кажущегося сопротивления 50-150 ом·м и хорошо выделяются на фоне вмещающих пород (~1000 ом·м). На основании результатов решения обратной задачи были построены

геоэлектрические разрезы вдоль разведочных профилей (Рис.3), позволяющие оценить глубину залегания нижней границы шлаковой толщи.

Результаты работ на этом участке показали высокую эффективность использованного аппаратурно-программного комплекса для исследования объектов такого типа.

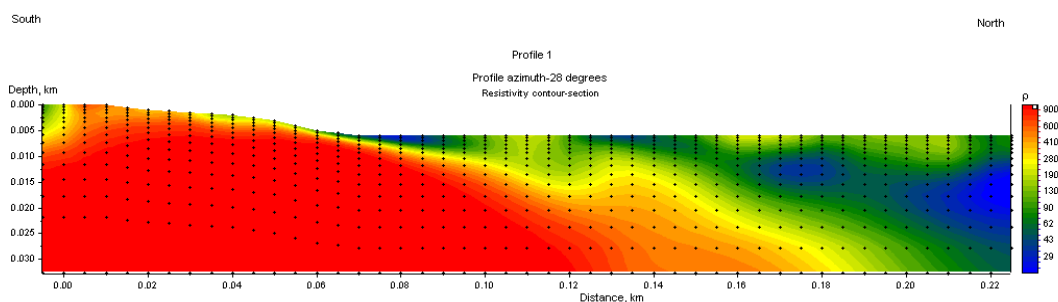


Рисунок 3. Результаты 2D инверсии вдоль одного из профилей на свалке угольных шлаков.

Следует особо подчеркнуть, что объект исследований имел сложное, резко отличное от горизонтально-слоистого строение. Поэтому применение одномерной, а в ряде случаев и двумерной инверсии могло не дать точных результатов. Однако, в рамках поставленных задач (картирование свалки и приблизительная оценка мощности шлаковых отложений) показало удовлетворительные результаты.

### Исследование автозаправочных станций

Основной задачей работ была оценка применимости РМТ метода с аппаратурой РМТ-F при изучении геологического строения участков АЗС в условиях высокого уровня промышленных помех в присутствии подземных труб, кабелей и металлических емкостей, и поиск утечек нефтепродуктов. В ходе работ было установлено, что несмотря на высокий уровень промышленных помех, данные имеют приемлемое качество. В большинстве случаев влияние помех было устранено при помощи специального программного обеспечения обработки данных. В результате были получены пригодные для инверсии кривые РМТ зондирования [Simakov, 2008 г.].

Двумерная инверсия в программе ZondMT2D позволила получить геоэлектрические разрезы, отражающие геологические особенности участка работ. На Рисунке 4 представлен разрез удельных сопротивлений вдоль профиля, проходившего вдоль автозаправки, с вынесенной на него литологической колонкой.

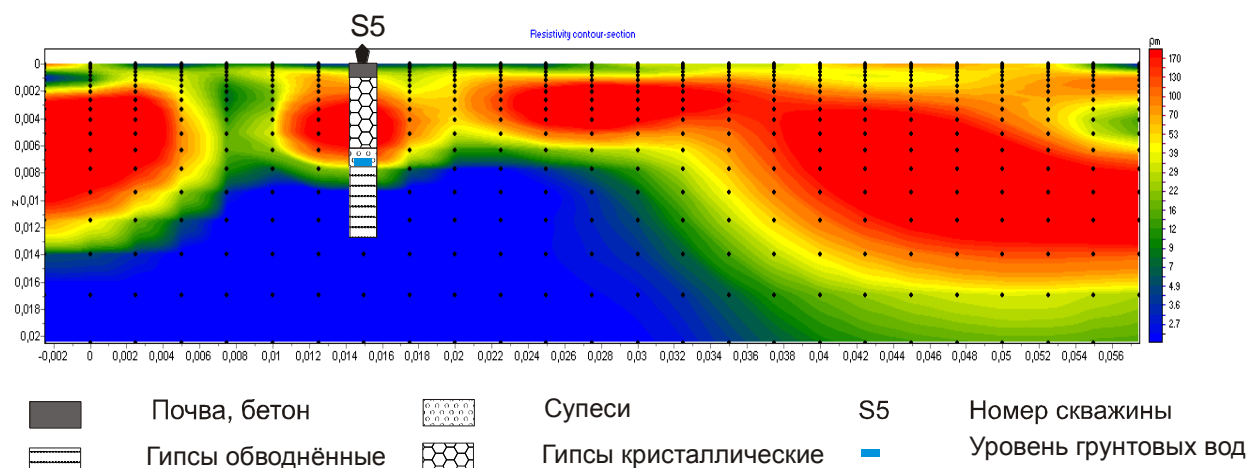


Рисунок 4. Результаты 2D инверсии вдоль профиля на автозаправочной станции с результатами контрольного бурения.

На разрезе отчётливо выделяются верхний относительно высокоомный (~500 ом·м) слой и низкоомное основание (7-10 ом·м). Согласно результатам бурения разрез сложен кристаллическими гипсами с прослоями супесей. Граница слоёв на геоэлектрическом разрезе в районе скважины соответствует уровню грунтовых вод по данным бурения.

### Инженерно-геологические изыскания

Объект исследований находится в районе поселка Копорье в Ленинградской области. Основной задачей работ являлось детальное расчленение верхней части геологического разреза. Кроме РМТ зондирований, также были проведены исследования методами ВЭЗ и электротомографией.

Интерпретация данных метода РМТ, ВЭЗ и электротомографии проводилась при помощи программ пакета Zond (ZondMT1D, ZondMT2D, ZondRes2d, Zond-IP).

На полученных в результате инверсии геоэлектрических разрезах были выделены следующие подразделения: приповерхностный слой пород с пониженным удельным электрическим сопротивлением (30–50 ом·м). Толща пород с повышенным удельным сопротивлением (200–400 ом·м). Основание разреза имеет удельное сопротивление не более 50 ом·м. На рис. 5 представлены результаты одномерной инверсии данных РМТ и ВЭЗ вдоль одного из профилей (Рис. 5А) и двумерной инверсии данных РМТ и электротомографии (Рис. 5Б).

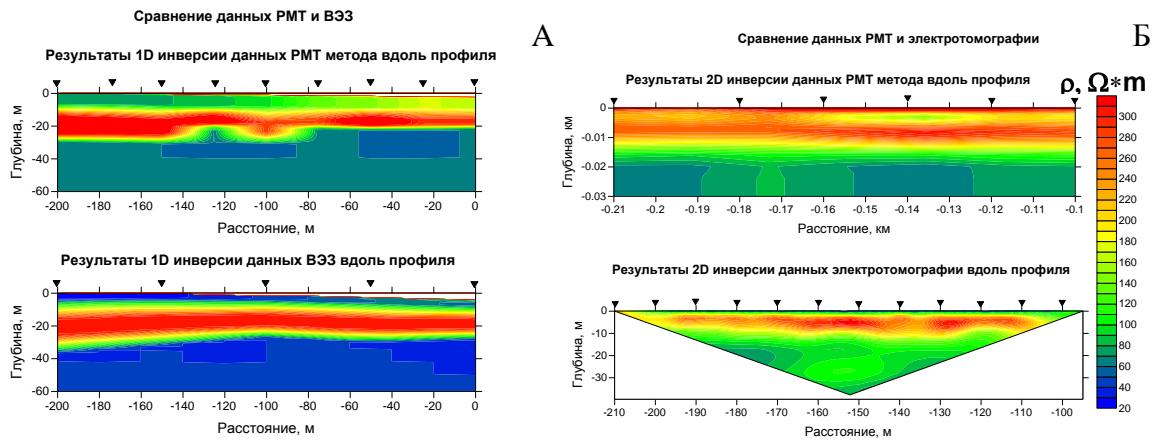


Рисунок 5. Сопоставление результатов интерпретации данных РМТ и ВЭЗ (А) и данных РМТ и электротомографии (Б) в пос. Копорье.

Авторы статьи выражают благодарность Б.Г. Сапожникову, К.В. Титову и А. Исупову за предоставленные данные ВЭЗ и электротомографии, а также А. Лацыгиной за помощь в обработке данных ВЭЗ.

## Литература

1. Гордеев С.Г., Седельников Е.С., Тархов А.Г. Электроразведка методом радиокип // М. Недра, 1981, 132 с.
2. Симаков А.Е, Пертель М.И, Сараев А.К., Хименес Х.М., Торре К., Мартин П. Возможности радиоманнитотеллурического метода при решении экологических задач.// 2007 Сборник "Вопросы геофизики". вып. 40 СПб.: Изд-во С.-Петрб. ун-та. С. 101-109.
3. Яковлев А.В., Ивочкин В.Г., Пертель М.И. Прибор для непрерывных измерений импеданса по методу РЭМП // Геофизическая аппаратура, 1977, т. 63. с. 12-18.
4. Bastani M. EnviroMT - a New Controlled Source/ Radio Magnetotelluric System // Acta Universitatis Upsalis. Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology 32, 2001 179 pp. Uppsala.
5. McNeil, J.D., Labson, V.F. Geological mapping using VLF radio fields // M.N. Nabighian (ed.). Electromagnetic methods in applied Geophysics, 1991. V.3, SEG, 521-640.
6. Pedersen L., Bastani M., Dynesius L. Some characteristics of the electromagnetic field from radio transmitters in Europe // Geophysics, 2006, vol. 71, No 6, p. G279-G284.
7. Simakov A., Pertel M., Saraev A., Tezkan B., Garcia A. and Torre C. Application of the radiomagnetotelluric method to the solution of environmental problems.// 19<sup>th</sup> Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth, Beijing, China, October 23-29, 2008.
8. Tezkan B., Saraev A., Shuman V., Georgescu P., Christensen N.B. On the first field data of a new radiomagnetotelluric device operating in the frequency range from 10 kHz to 1 MHz // 18<sup>th</sup> International Workshop on Electromagnetic induction in the Earth, El Vendrell, Spain, September 2006, p.17-23.
9. Tezkan B., Saraev A. A new broadband radiomagnetotelluric instrument: applications to near surface investigations. // Near Surface Geophysics, 2008, Vol. 6, No 4. P.245-252.