

МАЛОГЛУБИННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРУНТА МЕТОДОМ ЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С ПОМОЩЬЮ СКАНЕРА «НЕМФИС»

Д.Б. Романов (ФСГ «Экология»)

В 2002 г. окончил Московский энергетический институт (Технический университет) по специальности «автоматизация промышленных установок и технологических комплексов». С 2002 г. работает в ЗАО ФСГ «Экология», в настоящее время — технический директор.

Взаимодействие человека с окружающей средой и, в частности, исследование земной поверхности на глубину до 10 м (подповерхностного пространства) связано со строительством и эксплуатацией подземных инженерных коммуникаций, изучением условий распространения грунтовых вод и их минерализации, поиском археологических объектов и т. п. Это порождает большое число задач, решение которых необходимо строить на бесконтактном неразрушающем дистанционном методе исследования, создающем легко и однозначно интерпретируемые пользователем изображения однородности грунтов и находящихся в них объектов.

В мировой практике известно много подходов к изучению структуры грунта и объектов, залегающих в верхней части подповерхностного пространства. Они основаны на различных методах: электрического и электромагнитного зондирования, магниторазведки, радиоволнового зондирования (георадарометрия) и др. Также известны попытки применения малоуглубинного частотного зондирования. Каждый из них, на-

ряду с преимуществами, обладает некоторыми недостатками: большие временные затраты, необходимость гальванического контакта с грунтом (методы постоянного тока), недостаточная информативность данных, низкая помехоустойчивость (частотное картирование, магниторазведка), узкая область применения (трассоискатели), сложность интерпретации и высокая стоимость аппаратуры (георадары). Кроме того, они не позволяют получить быстрое двумерное представление подповерхностных объектов в виде вертикального геоэлектрического разреза.

За последние 30 лет интенсивно развивались и получили практическое применение ме-

тоды геофизических исследований, основанные на использовании переменных электромагнитных полей, среди которых широкое распространение получил метод частотного электромагнитного зондирования. Основополагающие работы по теории метода принадлежат Л.Л. Ваньяну, А.А. Кауфману, Г.М. Морозовой, Л.А. Табаровскому, М.И. Эпову и другим геофизикам.

В данной статье основное внимание уделено частотному электромагнитному сканеру «Немфис» (рис. 1), разработанному в лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (Новосибирск, www.emf.ru), а также



Рис. 1
Общий вид сканера «Немфис»

опыту и перспективам его использования.

▼ **История создания и опыт применения сканера «Немфис»**

Сканер «Немфис» представляет собой трехкатушечный электромагнитный зонд, предназначенный для измерения кажущейся удельной электрической проводимости грунтов на 14-ти частотах. В месте работ допускаются электромагнитные помехи. Комплекс применяется для изучения состава, строения и условий залегания горных пород в археологических исследованиях, при контроле состояния подземных сооружений, для обнаружения и локализации захоронений промышленных отходов, при поиске источника и оценке объема утечки нефтепродуктов из подземных емкостей, исследовании инженерных коммуникаций и т. п.

Первый прототип аппаратуры был собран в 1996 г., но из-за кризисной обстановки в стране намерения о внедрении и серийном производстве электромагнитных сканеров были оставлены до лучших времен. В 2001 г. в лаборатории института был собран второй прототип прибора, с которого началось развитие производства и апробирование методики измерений.

Последние семь лет электромагнитный сканер применялся в различных учреждениях РАН. С помощью прибора в период с 2001 г. по 2009 г. были проведены многочисленные работы в России и за рубежом, направленные на исследование грунтов при инженерно-геологических изысканиях, поиск и локализацию археологических памятников, не выраженных на дневной поверхности, инженерно-экологический анализ мест загрязнения, оконтуривание границ объектов техногенного захоронения, исследование взаимосвязи уровня плодород-

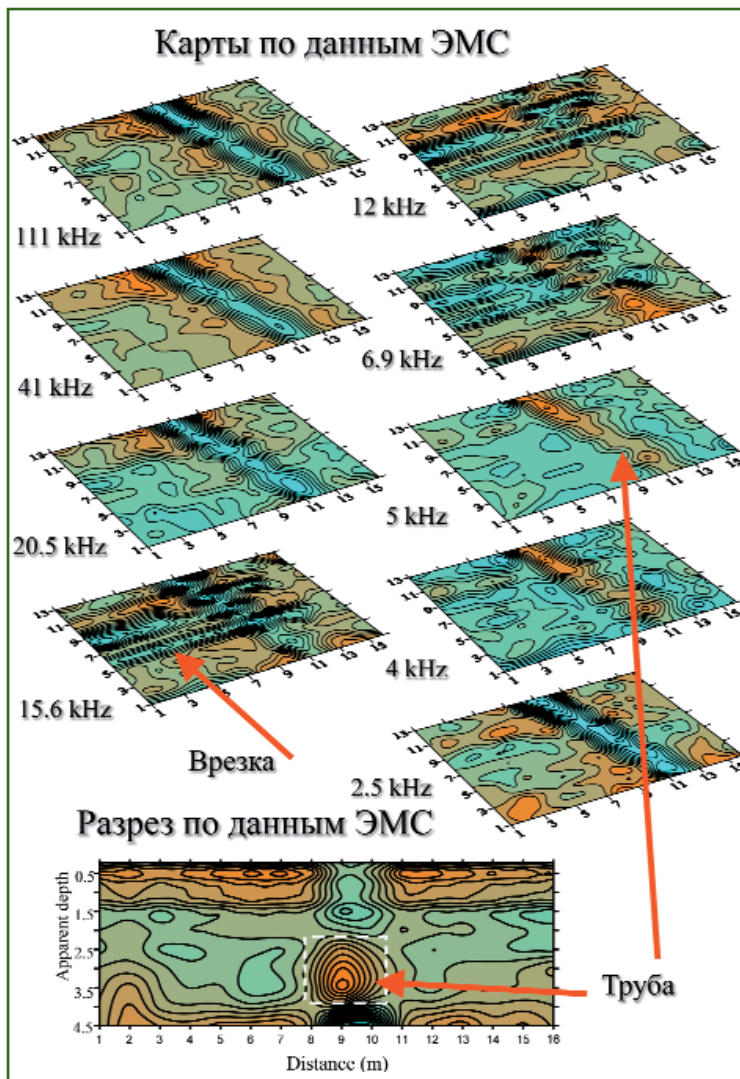


Рис. 2
 Геоэлектрические карты на разных частотах измерений и геоэлектрический вертикальный разрез

дия земли с ее электропроводностью и др. Они выполнялись на территории Новосибирской области и Алтайского края, Самарской области (2001), Италии (2002), Кемеровской области, Красноярского края и Монголии (2005–2007), Камчатского края (2008), Франции (2009). Впервые в мире с использованием разработанной методики была детально изучена конфигурация гидрохимической зональности подповерхностных вулкано-генных структур: фумарол, грязевых котлов и подземных потоков гидротермальных вод вулканов Южной Камчатки.

В настоящее время электромагнитный сканер «Немфис»

используется в научных исследованиях в Институте проблем освоения Севера СО РАН (Тюмень), Институте археологии и этнографии СО РАН (Новосибирск), Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (Петропавловск-Камчатский) и Институте Антарктики (Италия). Он находит применение на предприятиях жилищно-коммунального хозяйства городов, в крупных производственных и изыскательских организациях (ОАО «Самаратрансгаз», ОАО «Транснефть», ОАО РАО ЕЭС, ОАО «Восточно-Сибирская нефтяная компания» (Красноярск), ООО «Главгросстрой» (Новосибирск), ОАО «Росатом», ЗАО

«НИПИ ИнжГео» (Краснодар) и др.).

Эффективность выполненных работ с помощью сканера «Немфис» обусловлена, в первую очередь, простотой методики изучения малоглубинных объектов. Для решения различных практических задач археологии, инженерной геологии и экологии, требующих изучения верхней части земной поверхности (до 10 м), достаточно по результатам измерений построить геоэлектрические карты и/или геоэлектрические вертикальные разрезы (рис. 2). Геоэлектрические карты и геоэлектрические вертикальные разрезы представляют собой пространственно-привязанные значения среднего кажущегося удельного электрического сопротивления, отображаемые изолиниями или цветными градиентными картограммами, цвет которых плавно изменяется в зависимости от значения кажущегося удельного электрического сопротивления. Кроме того, предлагаемая методика измерений позволяет осуществлять трехмерное моделирование положения инженерных коммуникаций, изготовленных из различных материалов (рис. 3).

Привязка геологических структур по глубине возможна при наличии одного опорного объекта с известной глубиной

либо одного опорного разреза по данным вертикального электрического зондирования. Данные, полученные с помощью разработанной методики:

- позволяют определить пространственную структуру подповерхностных объектов в режиме реального времени (при качественной интерпретации);

- с практической точностью согласуются с априорными данными, а также с данными, полученными другими геофизическими методами (магниторазведкой, методами постоянного тока, георадарометрией) и прямыми наблюдениями по результатам раскопок и бурения;

- обеспечивают быстрое построение геоэлектрических карт и разрезов;

- являются информативными даже в городских и промышленных условиях, при чрезвычайно высоком уровне электромагнитных помех, большом числе сильно проводящих объектов и конструкций на поверхности;

- могут быть использованы для изучения геологических объектов низкого электрического сопротивления (около 1 Ом на 1 м и ниже);

- обеспечивают экономически выгодное и быстрое получение достоверных данных о подповерхностных геоэлектрических неоднородностях.

▼ Сравнительная оценка различного оборудования

По инициативе Института нефтегазовой геологии и геофизики и компании Geostudi Astier s.r.l. (Италия) были проведены сравнительные полевые испытания методами частотного электромагнитного зондирования, георадарометрии (Geophysical Survey Systems, Inc. — GSSI, США), двухмерной томографии на постоянном токе (IRIS Instruments, Франция) и частотного профилирования (Geonics Ltd., Канада), магниторазведки (Geometrics, США) и многочастотного электромагнитного профилирования (GSSI) на тестовых участках. Целевыми объектами служили археологические памятники древнеримской и средневековой эпохи, металлические трубопроводы, подземные городские сооружения, погребенные остатки зданий. В результате было выявлено преимущество метода частотного электромагнитного зондирования в помехоустойчивости, чувствительности, точности перед существующими решениями, основанными на других методах.

В настоящее время практически всю малоглубинную геофизическую аппаратуру, основанную на методе частотного электромагнитного зондирования, производят следующие компании: Geonics, GSSI и Geophex, Inc. (США). Следует отметить, что приборы этих компаний предназначены только для построения геоэлектрической карты изучаемой площадки и практически непригодны для визуализации измеренных сигналов на разных частотах в виде разрезов, поскольку они представляют собой двухкатодные системы, в которых полезный сигнал приходится измерять на уровне сигнала прямого поля. В мнимую компоненту электродвижущей силы в любом случае входит часть прямо-

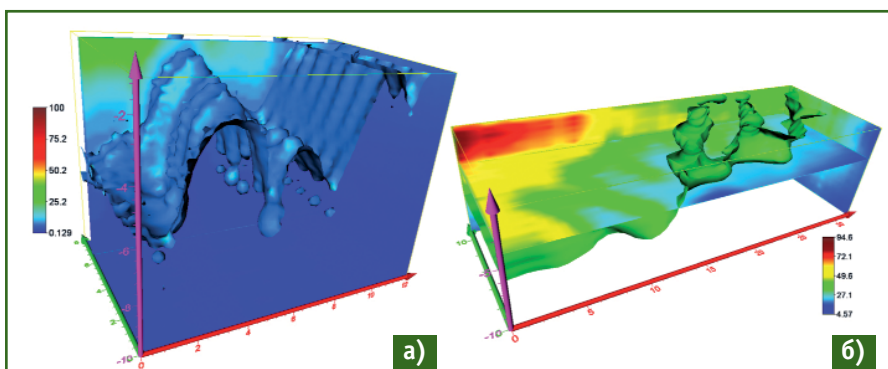


Рис. 3

Трехмерное моделирование положения инженерных коммуникаций различного типа: а) металлические трубопроводы; б) пластиковые трубопроводы

го поля. В реальную компоненту сигнала прямое поле вносит существенный вклад из-за несовершенства определения фазы. Таким образом, возникают сложности при разработке многочастотной аппаратуры. Для выделения полезного сигнала с достаточной точностью необходимо заложить практически не реализуемый динамический диапазон и уровень собственных шумов.

Трехкатушечная схема компенсации, реализованная в сканере «Немфис», обеспечивает достаточно малый вклад прямого поля в измеряемый сигнал. В принятых диапазонах сопротивления и частоты он составляет не более 5% от вторичного сигнала даже при реальной точности фазировки. Это дает возможность достичь необходимого динамического диапазона и точности измерений. Кроме того, такая схема позволяет при проектировании и анализе возможностей аппаратуры не учитывать недокомпенсацию первичного поля, а выполнять все оценки только по вторичному полю.

▼ Полевые измерения сканером «Немфис»

При работе со сканером «Немфис» изучаемая на каждом пикете область пространства имеет форму эллипса с малым фиксированным диаметром (2,5 м) и одним большим переменным диаметром (0,5–10 м), зависящим от рабочей частоты. Аппаратура обладает разрешающей способностью в отношении объектов размером 0,5х0,5х2,5 м. В то же время можно обнаружить высококонтрастные объекты и меньшего размера.

В решении обратной задачи частотных зондирований нет возможности точно определить вертикальные размеры аномалий, поэтому для повышения точности необходимо применять частотное зондирование в комплексе с разведывательным

бурением, либо получать элементы привязки на исследуемую глубину иным способом, например, методом сопротивлений. Чрезвычайно важным является наличие априорной информации об объекте в виде исполнительных съемок, планов сетей инженерных коммуникаций.

Как известно, критерием применимости того или иного метода изучения объекта является не только информативность полученных результатов, но и скорость, а значит и стоимость получения данных. Поэтому оптимальный выбор метода полевых измерений, способа плановой привязки наблюдаемых точек, режима работы аппаратуры и типа визуализируемых данных являются необходимыми компонентами полевых работ.

Для изучения исследуемого объекта применяются следующие методы полевых наблюдений: линейные профили, площадная съемка по регулярной сетке наблюдений и площадная съемка по нерегулярной сетке. Наиболее информативной и простой является сетка наблюдений размером 1х1 м, позволяющая получить плотный «куб данных» с равномерным шагом. При изменении шага измерений изменяется разрешение геоэлектрических данных.

Плановое положение наблюдаемых точек можно задавать с

помощью рулеток или измерять GPS-навигатором. В первом случае привязка измеряемых сканером точек осуществляется по мерным делениям рулетки (рис. 4). При этом движение сканера организуется вдоль рулетки «змейкой». При использовании рулетки оператору сканера может потребоваться помощник.

В сканере «Немфис» используется беспроводной пульт управления на базе КПК, что обеспечивает визуализацию геоэлектрических карт и разрезов в режиме реального времени (рис. 5), а также позволяет осуществлять привязку точек измерений с помощью GPS-навигатора. При работе на открытой местности такая привязка дает точность, достаточную для инженерно-геологических изысканий, где размеры объектов в плане составляют 2–3 м. Использование GPS-навигатора существенно сокращает время полевых измерений и дает возможность оператору выполнять измерения без помощника, что снижает стоимость полевых работ. Хотя при работе с GPS-навигатором допустимо проводить измерения не по регулярной сетке, желательно придерживаться схемы движения «змейкой». При обработке данных с такой схемой движения достаточно просто можно получить и

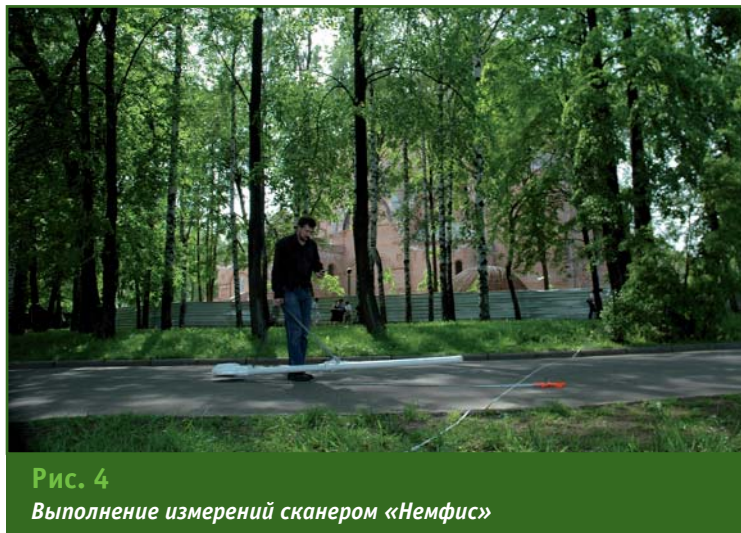


Рис. 4
Выполнение измерений сканером «Немфис»

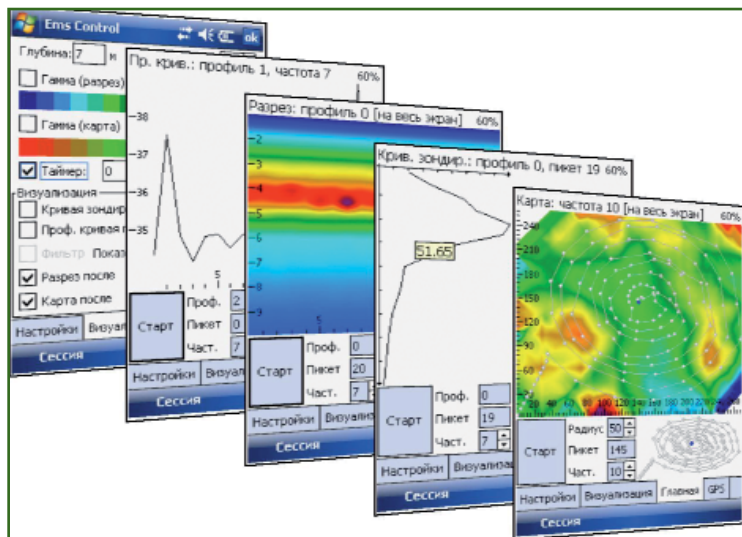


Рис. 5

Пример визуализации геоэлектрических карт и разрезов на экране КПК

геоэлектрические карты, и разрезы по прямолинейным участкам «змейки».

Ввиду достаточно высокой скорости работы сканера обычно использую все 14 частот. Однако при больших объемах целесообразно выполнить измерения на пробном участке, визуализировать данные, выбрать, а затем отключить те частоты, сигнал на которых не содержит полезной информации.

При исследовании грунта на предмет его водонасыщенности и/или литологического состава использование сканера может существенно снизить количество разведочных скважин. С другой стороны, можно рассматривать разведочное бурение как априорную информацию и/или второй метод, в совокупности с которым применение аппаратуры дает эффективное комплексное изучение разреза.

Затраты на исследование участка площадью 1 га с помощью частотного электромагнитного зондирования по себестоимости сопоставимы со стоимостью бурения двух геологоразведочных скважин на глубину 10 м каждая. Информативность же данных сравнима с разбуриванием участка по сетке 5x5 м. Таким образом, для тако-

го участка комплексные работы из 20 скважин и площадным исследованием с помощью частотного электромагнитного зондирования будут равны по стоимости бурению 22 скважин, а по информативности заменят данные с 400 скважин.

Опыт применения метода частотного электромагнитного зондирования с помощью сканера «Немфис» показывает, что подход к изучению подповерхностного пространства на глубину нескольких метров на основе качественных построений геоэлектрических карт и разрезов является информативным и экономически выгодным. Сравнительный анализ данной методики с существующими зарубежными технологиями, основанными на применении индукционных методов электроразведки, выявил ряд существенных преимуществ, таких как помехоустойчивость, высокая разрешающая способность и чувствительность.

Уникальными свойствами методики являются:

— возможность получения информации в виде геоэлектрических карт и разрезов кажущегося удельного электрического сопротивления в режиме реального времени;

— использование в условиях высокого уровня электромагнитных помех;

— возможность выполнять измерения при экстремально низких электрических сопротивлениях горных пород.

Область применения этого метода также может быть расширена. Среди перспективных направлений — изучение загрязнения грунтовых вод, исследование геохимических процессов в грунте над подземными газовыми хранилищами, анализ скальных оснований под россыпными золотоносными месторождениями, оценка качества почв сельскохозяйственного назначения. По всем этим направлениям уже ведутся работы, проведены первые эксперименты.

Благодаря простому принципу управления и методике интерпретации данных освоение работы с электромагнитным сканером «Немфис» занимает не более одного дня. В настоящее время наличие аппаратуры, реализующей метод частотного электромагнитного зондирования, открывает широкие перспективы его применения для малоуглубинных исследований грунта.



ЗАО ФСГ «Экология»

Тел: (495) 517-34-06,
(383) 248-81-12

Интернет: www.nemfis.ru

RESUME

Possibilities of using the electromagnetic scanner «Nemfis». It is a three-coil electromagnetic probe, designed to measure the apparent electrical soil conductivity at 14 frequencies. The technique of field measurements, the data processing and interpretation are given.