

ВОЗМОЖНОСТИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОЙ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ НИЗКООМНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД

А.А. Черемисин^{1,2}, Ю.В. Васильев², В.В. Оленченко^{3,6}, М.И. Эпов^{3,6}, Р.Е. Тойб⁴,
И.С. Шнипов⁴, С.В. Широков⁴, В.Б. Болтинцев⁵

¹Сибирский федеральный университет, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79/10, Россия

²Красноярский институт железнодорожного транспорта Иркутского государственного университета путей сообщения, 660028, Красноярск, ул. Ладо Кеңзовели, 89, Россия

³Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Котляго, 3, Россия

⁴ЗАО НПФ «ГеоТехМониторинг», 660028, Красноярск, ул. Баумана, 3, Россия

⁵ЗАО НПФ «Геодизонд», 196211, Санкт-Петербург, просп. Ю. Гагарина, 14, Россия

⁶Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

Представлена оценка возможностей метода электромагнитного импульсного сверхширокополосного (ЭМИ СШП) зондирования низкоомных геологических сред с использованием разработанной авторами СШП георадиолокационной системы в сопоставлении с данными измерений 2D электротомографии, а также с данными стандартной георадиолокации. Исследования проведены на участке залегания четвертичных глинистых пород с удельным электрическим сопротивлением 20—50 Ом·м. Показано, что при использовании георадара ОКО-2 с антенным блоком с центральной частотой 150 МГц для зондирования среды глубинность исследований составляет 2—4 м. При зондировании СШП-комплексом проникновение георадарного импульса прослеживалось до глубины 30—40 м. Большая глубинность СШП георадиолокации низкоомных сред становится возможной при реализации ряда условий: использования специальных мощных генераторов на дрейфовых диодах с резким восстановлением обратного напряжения, хорошего согласования СШП приемных и передающих антенн со средой, повышения помехоустойчивости системы регистрации, в частности, за счет снижения интенсивности воздушных волн.

Сверхширокополосная георадиолокация, электротомография.

POTENTIALITIES OF ULTRAWIDEBAND GPR IN LOW-RESISTIVITY GEOENVIRONMENTS

A.A. Cheremisin, Yu.V. Vasil'ev, V.V. Olenchenko, M.I. Epov, R.E. Toib,
I.S. Shnipov, S.V. Shirokov, and V.B. Boltintsev

We assess the potentialities of ultrawideband (UWB) electromagnetic pulse sounding of low-resistivity geoenvironments using the ground-penetrating radar (GPR) system developed by us and compare the obtained results with 2D electrical resistivity tomography and standard GPR data. The research was performed in an area of Quaternary clay deposits with a resistivity of 20–50 Ohm·m. For an OKO-2 GPR antenna with a center frequency of 150 MHz, the sounding depth is 2–4 m, whereas UWB sounding provides penetration of the GPR pulse to a depth of 30–40 m. Deep UWB sounding of low-resistivity environments is possible under the following conditions: use of generators based on drift step recovery diodes (DSRDs), high matching of the UWB receiving and transmitting antennas to the environment, and an increase in the noise immunity of the recording system, in particular, due to a decrease in the intensity of air waves.

Ultrawideband GPR, electrical resistivity tomography

ВВЕДЕНИЕ

Сегодня инженерно-геологические задачи по неразрушающему контролю массива горных пород и процессов, вызванных техногенной деятельностью, являются востребованными. В последние несколько десятилетий определенный вклад в исследование подповерхностной среды вносят георадары [Engineering..., 2015]. Интерес к этой тематике отражает высокая публикационная активность, включающая выпуск книг [Ground..., 2004, 2009; Вопросы..., 2005; Civil..., 2015], посвященных, в частности, вопросам исследования осадочных пород и карстовых структур [Ground..., 2003], применения георадаров в археологии [Goodman, Piro, 2013] и обнаружения в грунте нераззорвавшихся снарядов и мин [Unexploded..., 2008].

Георадиолокационные системы различаются составом и характеристиками аппаратуры, изготовленной различными производителями. Но для всех этих аппаратных комплексов есть общее ограничение по глубине зондирования. Глубинность георадарных исследований, как сформулировано в работе [Engrone et al., 2015], находится в пределах первых метров. В этой работе зондирование было проведено до глубин 4—5 м при использовании 100 МГц антенны. Глубина проникновения георадиолокационного сигнала в среду зависит от ее проводимости, а также от частоты, на которую настроены антенны георадиолокационной системы. В высокоомных средах глубина зондирования максимальна. Так, георадиолокация с использованием 200 МГц антенн обеспечивает хорошие результаты по поиску карстовых каверн в пределах 10 м в известняках [Pepe et al., 2015]. Еще больших глубин (20—30 м) можно достичь при поиске трещин в гранитах с помощью 100 МГц антенн [Luodes et al., 2015]. К низкоомным средам относятся четвертичные отложения с удельным электрическим сопротивлением (УЭС) менее 50 Ом·м (супеси, суглинки, глины). Низкое УЭС среды, как правило, связано с высоким содержанием глинистых частиц. В этом случае при использовании, например, 200 МГц антенн ослабление сигнала может быть настолько велико, что затрудняет определение уровня грунтовых вод даже на небольших глубинах (~3 м) [Mahmoudzadeh et al., 2012]. Илестые отложения также сильно ограничивают возможность георадиолокационного обследования [Hirsch et al., 2008].

Для увеличения возможностей георадиолокационного обследования в последнее десятилетие развиваются подходы к решению задач зондирования, связанных с расширением полосы рабочих частот, с созданием так называемых сверхширокополосных (СШП) систем [Ultrawideband..., 2012]. Одним из состоятельных реализаций такого подхода является создание моноимпульсных сверхширокополосных георадаров Грот-12, которые позволили достичь заметно бóльших глубин зондирования, чем системы, собранные по традиционной схеме и использующие квазимонохроматические сигналы [Волкомирская и др., 2012]. Развиваются методы моделирования генерации и распространения СШП-сигналов для таких сложных условий, которые, например, реализуются при размещении импульсных зондов в буровых скважинах, проходящих через нефтегазовые слои [Эпов и др., 2011].

В данной работе представлена оценка возможностей метода электромагнитного импульсного сверхширокополосного (ЭМИ СШП) зондирования низкоомных геологических сред с использованием развиваемой нами георадиолокационной системы в сопоставлении с данными измерений 2D электро-томографии, а также с данными стандартной георадиолокации.

Метод зондирования сверхширокополосным электромагнитным импульсом является разновидностью радиолокационного метода подповерхностного зондирования. Электромагнитный импульс наносекундной длительности, распространяясь в среде, подвержен процессам поглощения, рассеяния и отражения, которые зависят от неоднородной структуры исследуемой среды и ее свойств: диэлектрической проницаемости, электрической проводимости, поляризуемости. Разрабатываемая нами СШП-система основана на иных научно-технических решениях [Черемисин, Болтинцев, 2012], чем георадары Грот-12, в которых, в частности, используются резистивно-нагруженные приемные и передающие антенны и искровые генераторы импульсов.

Кроме СШП-георадара в данной работе использован также георадар ОКО-2.

Двумерная электротомография является методом, который широко применяется в практике геофизических исследований. Ряд исследований показал, что комплексирование данных георадиолокации и электротомографии является удачным подходом при изучении таких сложных объектов, как карстовые системы [Carrière et al., 2013], при обследовании торфяников [Comas et al., 2015] и выявлении каналов утечки воды с рисовых полей, возникающих под воздействием факторов добычи угля и трещин в грунте [Li et al., 2014]. При идентификации подповерхностных структур георадиолокационным методом опираются также на данные скважинных исследований и обследования выхода близлежащих пород. Это позволяет улучшить интерпретацию структуры осадочных пород, трещин и карстовых образований [Fernandez et al., 2015].

В русле такого подхода и выполнена данная работа. Немаловажно, что электротомография дает оценку проводимости среды, для которой проведены георадиолокационные исследования. В качестве объекта исследования была выбрана среда, в основе своей состоящая из трех слоев: четвертичные отложения, кора выветривания и коренная порода, причем самый верхний слой четвертичных отложений является низкоомным (25—50 Ом·м).

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Участок исследований расположен на правом берегу р. Обь, в 8 км к востоку от новосибирского Академгородка в районе научного стационара «Ключи» Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН (ИНГГ СО РАН), где на прилегающей к стационару территории организован полигон для опытно-методических геофизических исследований (рис.1).

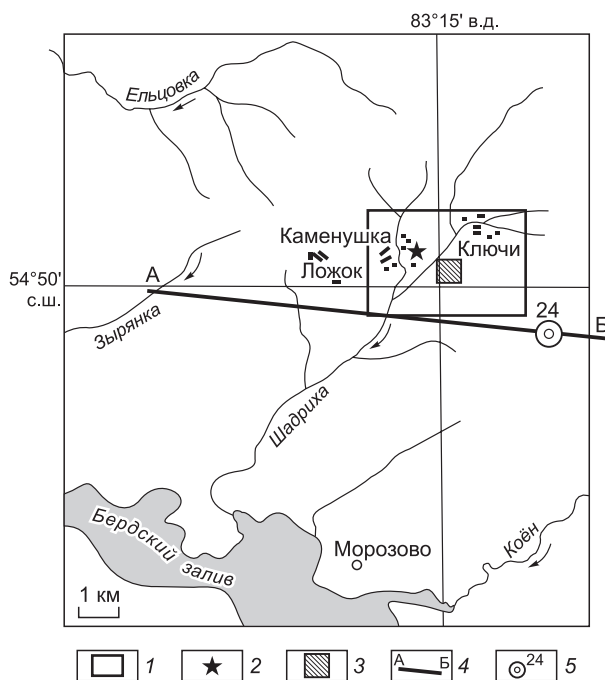


Рис. 1. Карта района исследований:

1 — контур полигона ИНГГ СО РАН, 2 — стационар «Ключи», 3 — участок опытно-методического СШП зондирования, 4 — линия геологического разреза, 5 — структурно-картировочная скважина.

Территория полигона находится на Шадрихинской площади в бассейне небольшой р. Шадриха. По данным [Васютинская и др., 1959], в геологическом строении района принимают участие отложения юргинской свиты ($D_3\text{jur}$), представленные песчаниками, алевролитами, глинистыми и известковыми сланцами с прослоями известняков и аргиллитов. Геологический разрез, характеризующий строение района исследований, показан на рис. 2.

На поверхности юргинской свиты широко распространены образования древней коры выветривания. Они сложены белыми пестроцветными каолинит-гидрослюдистыми глинами, в нижней части своего разреза переходящие в структурный элювий сланцев или песчаников, часто сохраняющими особенности строения исходных пород.

Глубина залегания кровли коры выветривания от поверхности колеблется от 0 до 106 м. Мощность элювиальных продуктов коры выветривания варьирует от 0 до 26 м. Кора выветривания перекрыта третичными отложениями краснодубровской свиты ($Q_2\text{krd}$), представленными лессовидными суглинками. Осадки краснодубровской свиты залегают на отложениях кочковской свиты (глина), породах палеозоя или глинистых продуктах коры их выветривания.

В пределах полигона стационара «Ключи» ранее были проведены электрические зондирования методом электротомографии (ЭТ), аудиоманнитотеллурические зондирования (АМТЗ), магниторазведка и радиометрическая съемка с целью изучения структурно-геологического строения Шадрихинской площади, определения положения стационара относительно крупных геологических структур и их выражения в геофизических полях [Горностаева и др., 2014]. В результате геофизических исследований было установлено, что четвертичные глинистые грунты (суглинки, глины) обладают низким удельным электрическим сопротивлением ($<50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) и служат проводящим экраном, что является неблагоприятным фактором для применения традиционной георадиолокационной технологии, например, для опре-

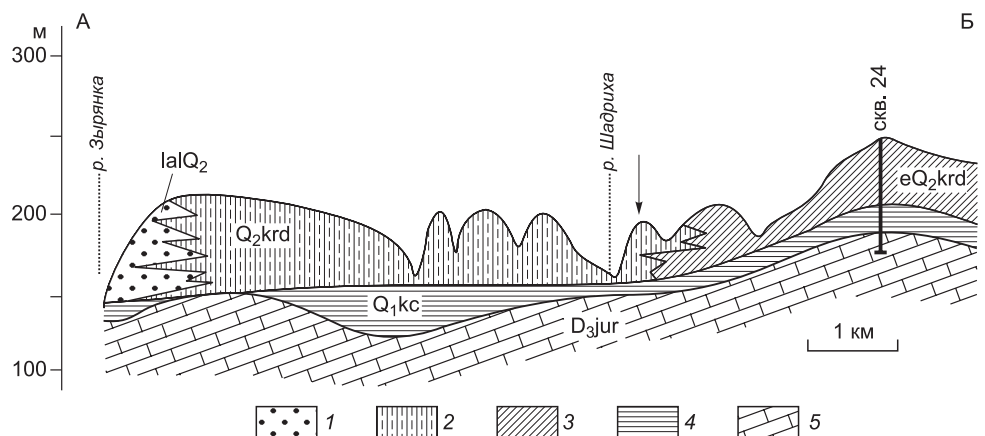


Рис. 2. Схематический геологический разрез района исследований по линии АБ [Васютинская и др., 1959]:

1 — озерно-аллювиальные пески краснодубровской свиты; 2 — переслаивание озерно-аллювиальных супесей, суглинков, песков краснодубровской свиты; 3 — покровный комплекс субаэральных лессовидных суглинков с прослоями песков, супесей, глин краснодубровской свиты; 4 — глины кочковской свиты; 5 — глинистые и алевроглинистые сланцы, известняки юргинской свиты. Стрелкой показан участок СШП-исследований.

деления положения кровли скальных пород. В пределах одной из выделенных зон с мощным (до 25 м) осадочным чехлом низкого удельного электрического сопротивления и строением, близким к горизонтально-слоистому, были проведены экспериментальные исследования возможностей сверхширокополосной георадиолокации при зондировании низкоомных геологических сред.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Электротомография (ЭТ) является современной модификацией метода вертикального электрического зондирования [Loke, 2009; Балков и др., 2012] и относится к группе методов сопротивления, основанных на законе Ома.

При зондированиях по технологии ЭТ нами была использована аппаратура Скала-48 [Балков и др., 2012]. Аппаратура представляет собой одноканальную электроразведочную станцию, коммутирующую подключение 48 электродов. Расстояние между электродами на стандартной косе составляет 5 м.

Предварительные исследования в пределах участка работ показали, что применяемая ранее установка ЭТ с максимальными разносами питающей линии АВ до 235 м обладает недостаточной глубиной для однозначного определения положения кровли палеозойского основания в разрезе.

Для изучения строения разреза использовали электроразведочную косу с межэлектродным шагом 10 м и максимальным разносом АВ до 470 м. При зондированиях применяли три конфигурации подключения электродов, соответствующие установкам Шлюмберже, прямой и обратной трехэлектродной (поле-дипольная). Такая комбинация измерительных установок дает лучшие результаты при инверсии данных, нежели каждая из установок в отдельности [Dahlin, Zhou, 2004; Бобачев, Горбунов, 2005; Szalai, Szarka, 2008; Балков и др., 2012].

В процессе измерений ток в питающей линии варьировал в пределах 150—450 мА, при этом разность потенциалов на приемных электродах составляла 1.7—180 мВ. При статистическом накоплении в 5 импульсов средняя квадратичная погрешность измерений обычно не превышала 1%. Единичные замеры с погрешностью более 1 % выбраковывались. Общее число измерений по протоколу для установки Шлюмберже составило 520, для установок поле—диполь 792 в каждой.

Массив измеренных кажущихся удельных электрических сопротивлений использовался далее для решения обратной задачи восстановления распределения истинного удельного электрического сопротивления по разрезу (2D инверсия данных). Эта задача выполнялась при помощи программного обеспечения Res2Dinv версии 3.56 [Loke, 2009] при стандартных ограничениях. Для инверсии применяли метод так называемой ограниченно-гладкой робастной инверсии [Loke, 2009] на основе минимизации суммы квадратов разности между измеренными и вычисленными кажущимися сопротивлениями. Итерационная процедура прерывалась при менее 5 % сходимости среднего квадратичного отклонения по разрезу между итерациями. При межэлектродном расстоянии между электродами в 10 м был построен геоэлектрический разрез по профилю на глубину до 85 м.

Георадиолокационные исследования аппаратурой ОКО-2. Вдоль профиля электротомографии было выполнено георадиолокационное зондирование георадаром ОКО-2 (ООО «Логис», Россия) с антенным блоком центральной частоты 150 МГц. Эта частота обеспечивает удовлетворительное разрешение по глубине порядка десятка сантиметров. Выбор антенны с частотой в диапазоне 100—250 МГц является обычной практикой компромисса между глубиной проникновения и разрешением по глубине [Carrere et al., 2013; Comas et al., 2015], применяемой при исследовании как в осадочных породах [Croud... , 2003], включая известняки [Pere et al., 2015], так и в скальных образованиях, например гранитах [Luodes et al., 2015]. Общая длина разреза (100 м) была измерена рулеткой, а расстояние по профилю фиксировалось с помощью датчика перемещения георадара ОКО-2; время записи сигнала — 400 нс; шаг по профилю (расстояние между соседними равноудаленными точками, в которых проводилась запись сигнала) — 0.05 м; накопление — 128 раз для улучшения соотношения сигнал/шум.

Для преобразования время—глубина использовалось одно и то же для ОКО-2 и СШП-измерений значение средней относительной диэлектрической проницаемости среды, равное 14, что соответствует скорости распространения сигнала 0.080 м/нс. Эта скорость является результатом усреднения измерений по гиперболам дифракции от точечных объектов в среде как по данным ОКО-2, так и по данным СШП-комплекса. Такая скорость характерна для сред изучаемого типа и соответствует опыту выполненных нами ранее работ.

Обработка данных георадара ОКО-2 осуществлялась в среде программного обеспечения «GeoScan32» ООО «Логис» [GeoScan32... , 2013] или «Georadar-Expert»¹ (Георадар-эксперт) и включала такие процедуры, как вычитание среднего для каждой индивидуальной записи, усиление амплитуд сигнала в зависимости от глубины для каждой отдельной записи по средней огибающей амплитуд для компенсации ослабления сигнала, частотная полосовая фильтрация.

¹ ГЕОРАДАР-ЭКСПЕРТ. <http://www.georadar-expert.ru>



Рис. 3. Общий вид приемопередающей аппаратуры ЭМИ СШП-зондирования:

1 — генератор электромагнитных импульсов на базе ДДРВ; 2 — излучающая лепестковая микрополосковая антенна метрового размера; 3 — приемная антенна, аналогичная 2; 4 — приемная антенна дециметрового размера типа монополь.

Границы слоев прослеживались на радарограммах по протяженным осям синфазности, а локальные объекты выделялись по наличию дифрагированной волны (гиперболе дифракции).

Метод ЭМИ СШП-зондирования. На этом же интервале профиля электротомографии, а также георадарного профиля ОКО-2 проведено зондирование СШП-георадаром.

Использованная в данной работе

аппаратная часть комплекса для СШП-зондирования состоит из специальных генераторов электромагнитных импульсов и сверхширокополосных антенных систем (рис. 3).

К СШП радарным системам, предназначенным для зондирования через материальные среды, относятся устройства, в основе которых лежит генерация и передача коротких электромагнитных импульсов. На практике широко применяются два наиболее важных критерия широкополосности. Одним из них является отношение ширины рабочей полосы частот к центральной (или средней) частоте полосы, которое для широкополосных систем должно быть больше 20—25 %. Другой критерий определяет абсолютную полосу рабочих частот, которая должна быть шириной более 500—700 МГц [Ultrawideband..., 2012].

Обоим критериям удовлетворяют системы, использующие импульсы длительностью менее 1.5 нс. Это позволяет достичь высокого пространственного разрешения при георадиолокации природных сред и конструкционных материалов на небольшую глубину, например, при обследовании асфальтового покрытия дорог или поиска арматурных стержней в бетонных перекрытиях, при локации через стены, при обнаружении мин, а также при медицинском обследовании [Биорадиолокация..., 2010].

Большинство георадаров, применяемых на практике для решения задач инженерной геологии и геофизики, предназначенных для работы на глубине более 1 м, имеют центральные частоты в диапазоне менее 500—700 МГц и сконструированы так, что отношение ширины полосы рабочих частот к центральной частоте равно приблизительно 100 % [Neto, Medeiros, 2006; Annan, 2009]. Формально по критерию относительной ширины полосы частот их можно отнести к СШП-системам. Тогда как критерий для абсолютной ширины полосы частот не выполняется.

Пространственное разрешение радаров для подповерхностного зондирования пропорционально центральной частоте сигнала. Чем выше частота, тем выше разрешение. Но высокочастотные сигналы сильнее затухают, и для увеличения глубины зондирования понижают частоту сигнала, поэтому при практическом применении георадаров требуется поиск компромисса между пространственным разрешением и глубиной, который достигается путем выбора соответствующей частоты для выполнения конкретной задачи. Это одна из причин, почему практические георадарные системы оснащаются целым набором приемопередающих антенн, имеющих разные центральные частоты.

Так, известные георадары системы SIR-3000, выпускаемые в США компанией Geophysical Survey Inc., в высокочастотной области могут оснащаться антеннами с центральными частотами 2.6; 1.6 и 0.9 ГГц, а в низкочастотной области — 400, 270, 200, 100 и 16—80 МГц [SIR:...]. Выпускаемые в России фирмой Логис-Геотех георадары в низкочастотной области снабжаются антенными блоками с центральными частотами 700, 400, 250, 150, 90 и 50 МГц (Сайт Геотех). Аналогичная ситуация наблюдается с комплектацией георадаров Mala Ground Explorer (Mala GeoScience), Pulse Ekko Pro and Noggin («Sensors & Software Inc.») и др.²

В нашей работе используется СШП георадарная система, основанная на несколько ином подходе к созданию такого рода систем [Черемисин, Болтинцев, 2012]. Важнейшее отличие заключается в том,

² Antenna Units. http://www.geotechru.com/market/geophysical_equipment/ground_penetrating_radar_gpr/antenna_units/

что для измерений на всех частотах используются одни и те же широкополосные антенны, хорошо согласованные со средой и работающие в диапазоне 1—700 МГц. Отношение ширины полосы рабочих частот к центральной частоте для этих антенн равно 2. По этому параметру наша система является более широкополосной, чем стандартные. Кроме того, она удовлетворяет критерию широкополосности и по абсолютному значению ширины полосы.

Для широкополосной георадарной системы такого рода не требуется поиск компромисса между глубиной и пространственным разрешением, т. е. не требуется менять антенны и генераторы импульсов, чтобы увеличить глубину зондирования, так как это происходит автоматически. Отраженные сигналы с меньших глубин содержат высокие частоты, а при увеличении глубины высокие частоты затухают, и сигнал становится низкочастотным. Разработан также подход по решению обратной задачи зондирования — выявление структуры подстилающей среды по данным георадиолокационных измерений в одной пространственной точке, который основан на использовании информационно-энтропийных критериев [Kullback, Leibler, 1951; Шеннон, 1963; Королев, 2011]. В принципе по совокупности отличий от стандартных методов георадиолокации можно говорить об особом методе — методе электромагнитного импульсного, сверхширокополосного, подповерхностного зондирования (метод ЭМИ СШП-зондирования). Этот метод нашел эффективное применение в инженерной геологии и строительной индустрии [Болтинцев и др., 2006; Безродный и др., 2010].

Для широкополосного зондирования подстилающей среды требуются генераторы наносекундных электромагнитных импульсов с достаточно стабильными амплитудно-частотными характеристиками. В этой связи эффективным оказалось применение генераторов на дрейфовых диодах с резким восстановлением обратного напряжения (ДДРВ), с помощью которых можно формировать импульсы наносекундной и пикосекундной длительности [Грехов и др., 1983]. Известно, что пиковая амплитуда тока в таких приборах может достигать 800 А [Грехов, Месяц, 2005]. Целая линейка таких мощных и обладающих стабильными характеристиками генераторов была специально разработана для применения в георадиолокации. В общем случае нами используется набор излучающих генераторов наносекундных импульсов, изготовленных по технологии ДДРВ специально для георадиолокационных исследований и имеющих фронты импульсов, примерно равные 0.5, 1 и 3 нс при длительности от 3 до 10 нс, пиковую амплитуду импульса напряжения 1, 3, 4.77, 6.3 и 9.87 кВ; пиковую амплитуду тока 20—120 А. Увеличение мощности генератора является наиболее простым и эффективным способом повышения глубинности георадиолокационных изысканий.

В данной работе использовался излучающий генератор ДДРВ (см. рис. 3(1)) с пиковой амплитудой импульса напряжения ~ 3 кВ, длительностью ~ 8 нс и с пиковой амплитудой тока порядка 40 А. На рис. 4 представлен вид импульса ДДРВ генератора на экране осциллографа TRM8105 (с рабочей полосой частот $\Delta f \sim 16$ ГГц) при его замыкании на аттенюатор BARTH, представляющий собой активное сопротивление 50 Ом в полосе частот $\Delta f \sim 26$ ГГц, а также амплитуда Фурье-спектра этого импульса, которая возрастает при смещении частоты в область низких частот.

При создании антенн для георадиолокации одной из важнейших проблем является согласование импедансов антенны с подстилающей средой. В данной работе используются два типа антенн: лепестковая микрополосковая антенна метрового размера (см. рис. 3 (2, 3)) и монополярная антенна дециметро-

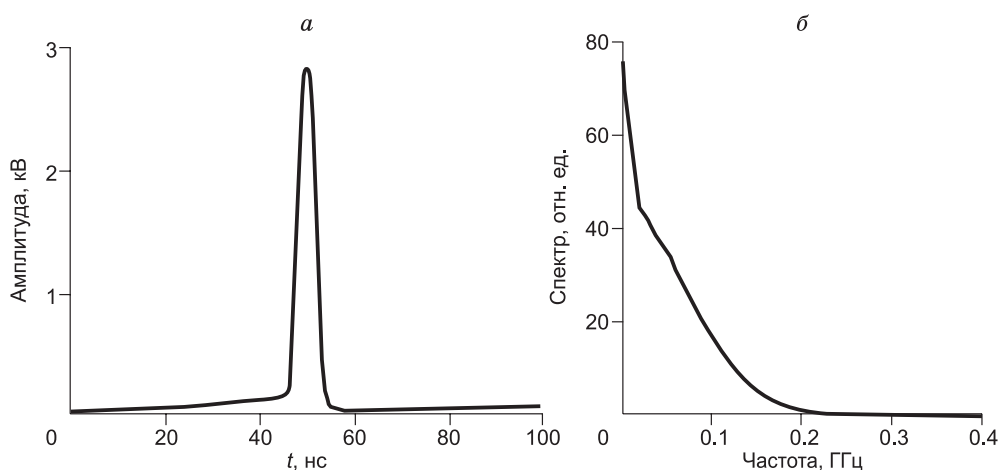


Рис. 4. Импульс ДДРВ генератора, используемого в данной работе для СШП георадиолокации (а) и спектр этого импульса (б).

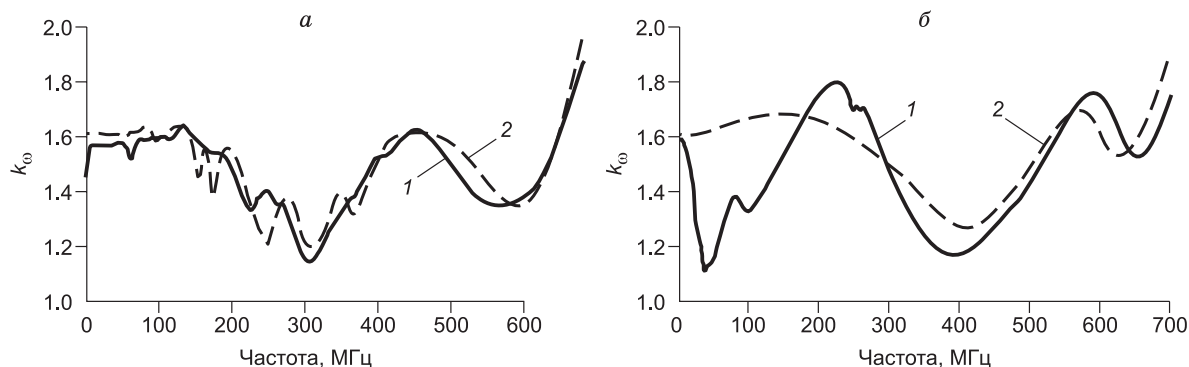


Рис. 5. Зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению k_0 от частоты для различных сред.

a — лепестковая микрополосковая антенна; *б* — монополярная антенна. 1 — антенны на гравийно-галечниковом грунте, 2 — на песке.

вого размера (см. рис. 3 (4)). Обе антенны хорошо согласованы со средой в широком диапазоне частот (рис. 5). Измерения коэффициента стоячей волны по напряжению k_0 проведены с помощью векторного анализатора «ОБЗОР-103», производства «Технический центр», Россия [ОБЗОР-103] с использованием измерительного тракта 50 Ом. Результаты представлены для диапазона 1 — 750 МГц. Погрешность измерений меняется от 2.5 % при $k_0 = 1$ до 4.5 % при $k_0 = 1.85$. Антенны были установлены на сухом песке или на гравийно-галечниковом грунте. Как видим, $k_0 < 1.85$ в случае микрополосковой антенны в полосе частот 0.3—700 МГц, а для монополярной антенны в диапазоне частот 0.3—650 МГц. При таком уровне согласования энергия от генератора передается антенне без существенных потерь.

Кроме близости величины коэффициента стоячей волны по напряжению к единице, хорошее согласование со средой подразумевает, что энергия электромагнитного импульса поступает в подстилающую среду, а не распространяется по воздуху, являясь источником тяжелых синхронных помех при отражении от препятствий, расположенных на поверхности. В аппаратном комплексе приняты дополнительные меры, повышающие помехозащищенность приемно-регистрирующего блока в полевых условиях. Эти вопросы будут затронуты ниже. Регистрация сигнала осуществлялась в наших исследованиях с помощью цифрового осциллографа LeCroy WavePro7100A с полосой пропускания $\Delta f \sim 1$ ГГц и полосой дискретизации 10 ГГц. В такой комплектации антенн метод СШП дает возможность проводить обследование сред до глубин 40—80 м в зависимости от типов изучаемых сред.

При обработке данных СШП-зондирования использовались те же процедуры, необходимые для получения качественных радарограмм, что и при обработке данных георадара ОКО-2, в среде программного обеспечения «GeoScan32». Для достижения целей, поставленных в данной работе, не потребовалось применения вышеупомянутых разработанных нами специальных методов обработки данных СШП-зондирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

По данным электротомографии был построен геоэлектрический разрез до глубины ~85 м (рис. 6). Верхняя часть разреза до глубины 10—20 м характеризуется низким (25—40 Ом·м) УЭС. Такие значения характерны для суглинков и супесей района исследований. Особенностью разреза является увеличение мощности верхнего проводящего слоя с 10 до 20 м по простиранию профиля. Ниже залегают породы с УЭС 70—100 Ом·м, интерпретируемые как кора выветривания глинистых сланцев. С глубины около 65 м на разрезе выделяется кровля высокоомного основания с УЭС 160—300 Ом·м. С глубиной отмечается увеличение УЭС до 800—2500 Ом·м.

На рис. 7 показана радарограмма по профилю электротомографии, полученная георадаром ОКО-2 с применением антенного блока центральной частоты 150 МГц. Шкала глубин на радарограмме построена для средней диэлектрической проницаемости разреза $\epsilon = 14$. По протяженным осям синфазности выделяются отражающие границы в верхней части разреза до глубины 4 м. Здесь же, в приповерхностном слое, выделяются гиперболы дифракции от локальных объектов. На временах, позднее 100 нс (глубинах более 4 м), однозначно регистрируются отражения от объектов в воздухе, выделяемые по характерным гиперболам дифракции, заметных отражающих границ в разрезе не отмечается.

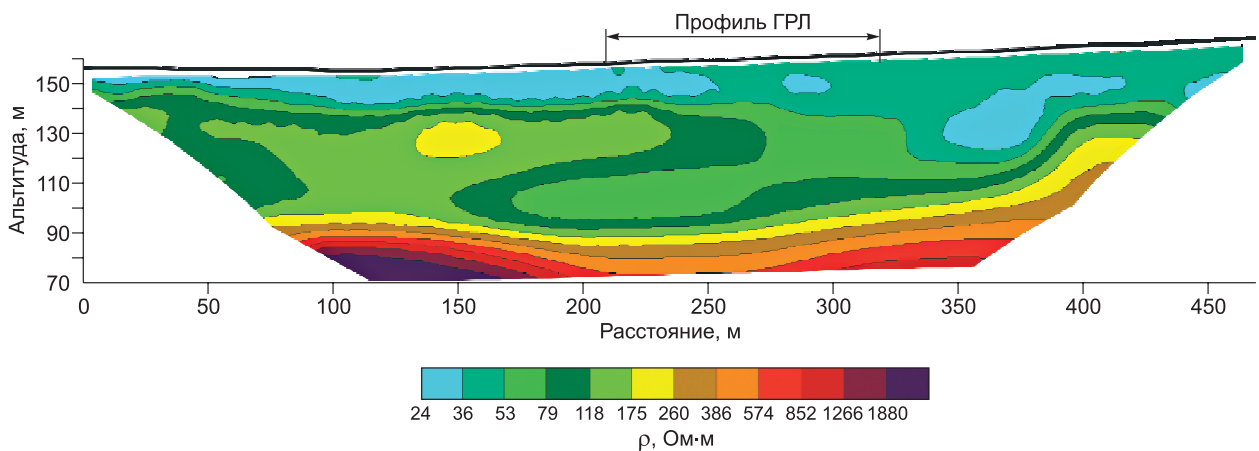


Рис. 6. Геоэлектрический разрез по данным электротомографии.

Указан участок профиля, на котором одновременно были проведены георадиолокационные исследования.

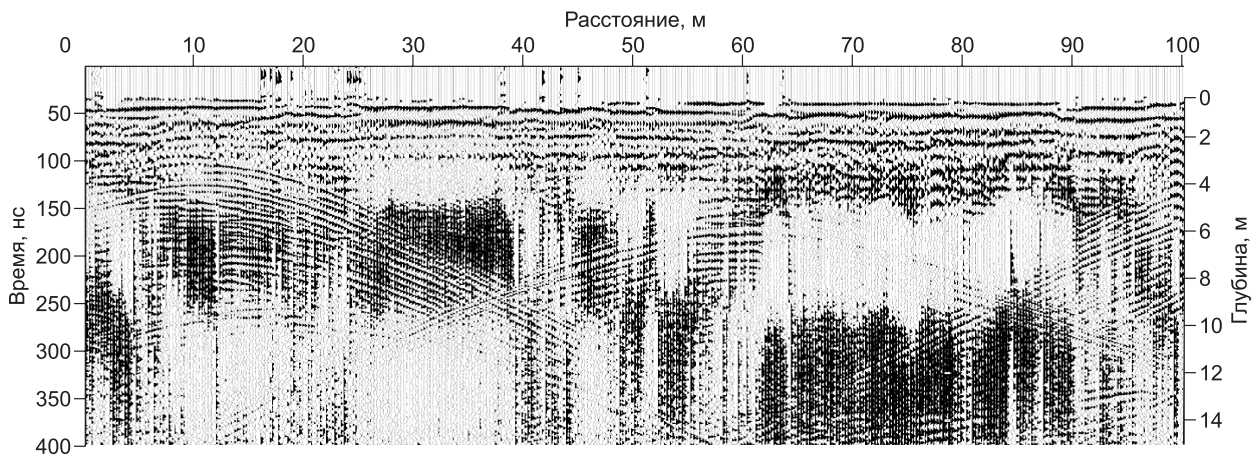


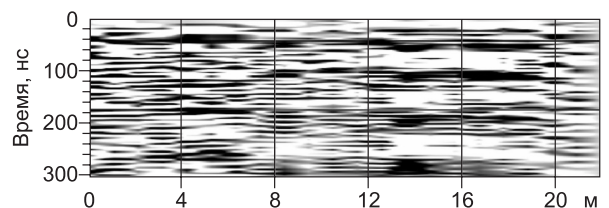
Рис. 7. Радарограмма, полученная георадаром ОКО-2, по профилю электротомографии.

Антенный блок 150 МГц, средняя относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon = 14$.

Особенностью георадаров является наличие сильной прямой воздушной волны от передатчика к приемнику без проникновения в исследуемую среду. Эта волна ярко выражена на радарограммах на самых ранних временах. В основном она является помехой. В этом же диапазоне времен фиксируется поверхностная волна, амплитуда которой зависит от расстояния от источника и латеральной однородности верхнего слоя. Эти волны легко выделяются при георадиолокационных исследованиях с переменной базой [Владов, Старовойтов, 2004].

В применяемом СШП-комплексе прямая воздушная волна сильно ослаблена. Для демонстрации этого эффекта был проведен специальный эксперимент, заключающийся в измерениях с переменным расстоянием между передающей и приемной антеннами. На рис. 8 представлен временной разрез, полученный с помощью лепестковой антенны метрового диапазона, которая смещалась от положения передающей антенны такого же типа с шагом 2 м на расстояние до 20 м. Измерения проводились вдоль георадиолокационного профиля на начальном его участке. Ослабление сигнала для каждой трассы

Рис. 8. Временной разрез с разверткой до 300 нс, полученный СШП-комплексом при удалении приемной антенны от передающей.



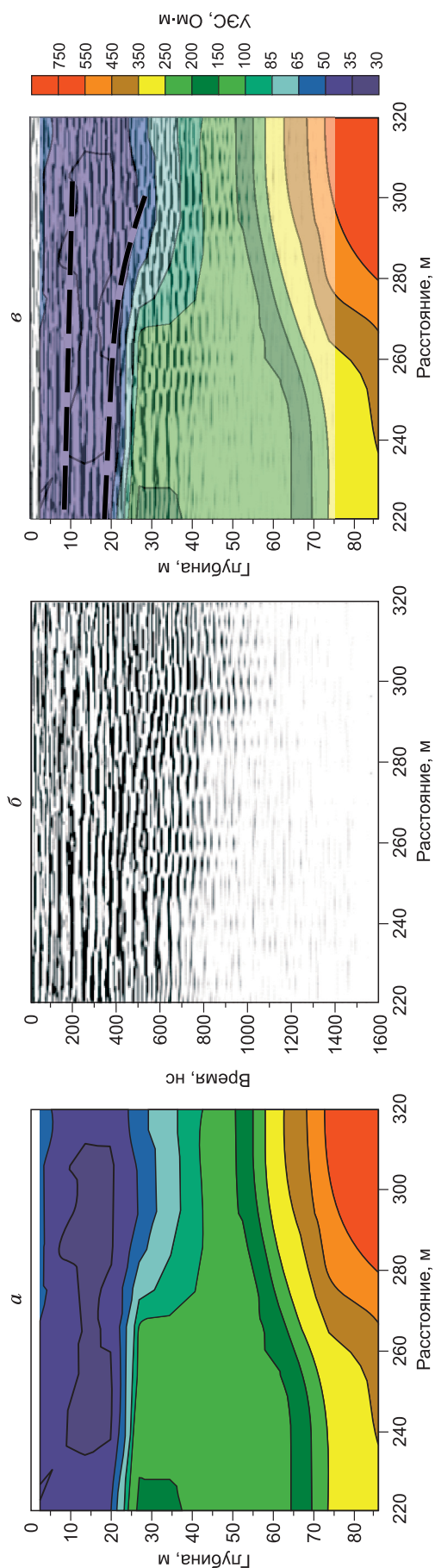


Рис. 9. Геоэлектрический разрез по данным ЭТ (а), радарограмма ЭМИ СШП (б) и совмещенный разрез (в).

измерения с увеличением расстояния между антеннами, а также и по времени компенсировано с помощью процедуры автоматического регулятора усиления, входящей в комплект используемого программного обеспечения.

Как видим, результаты исследований с переменным расстоянием между передающей и приемной антеннами указывают на практическое отсутствие прямой воздушной волны при использовании СШП-комплекса. По оценкам, в данном случае амплитуда прямой воздушной волны слабее волны, распространяющейся горизонтально вдоль поверхности грунта не менее чем на два порядка. Это, наряду с близостью коэффициента стоячей волны по напряжению к единице (см. рис. 5), характеризует хорошее согласование антенн со средой. Энергия, поступающая в антенну, уходит в подстилающую среду — в грунт, а не распространяется по воздуху.

Кроме того, полученный профиль не имеет наклонных годографов прямых электромагнитных волн, не только воздушной, но и поверхностной, что не характерно для стандартной георадиолокационной записи при удалении приемной антенны от передающей над слоистым разрезом. Дело в том, что для большинства разработанных на сегодняшний день передающих антенн и антенных блоков отечественных и зарубежных георадаров начало регистрации выполняется по синхроимпульсу. Доминирующими волновыми фронтами, которые обычно наблюдаются, являются прямая воздушная и затем прямая поверхностная волны [Струнд..., 2003; Вопросы..., 2005]. Мощность воздушной волны обычно достаточна для ее регистрации на расстоянии порядка 10 м [Neto et al., 2006], тогда как особенностью разработанной методики измерений с помощью СШП-комплекса является отсутствие прямой (оптоволоконной) синхронизации начала записи георадиолокационных сигналов по импульсу генератора. Регистрация сигнала — отклика начинается при превышении заданных пороговых его значений. Так как при работе с СШП-комплексом мы не наблюдаем прямой воздушной волны, которая могла бы достигнуть приемной антенны раньше других электромагнитных волн, в СШП-комплексе начало записи отсчитывается от момента прихода прямой волны по поверхности грунта.

Отсутствие канала синхронизации позволяет повысить глубину радиолокационного обследования за счет накопления сигнала. Специальные эксперименты, проведенные при создании СШП-комплекса, показали, что канал синхронизации является источником структурной помехи (подобной сигналу), которая весьма существенна при зондировании на больших глубинах. Накопление сигнала при этом становится неэффективным.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ ЭМИ СШП И ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ

Радарограмма по данным СШП-зондирования и фрагмент геоэлектрического разреза по данным ЭТ

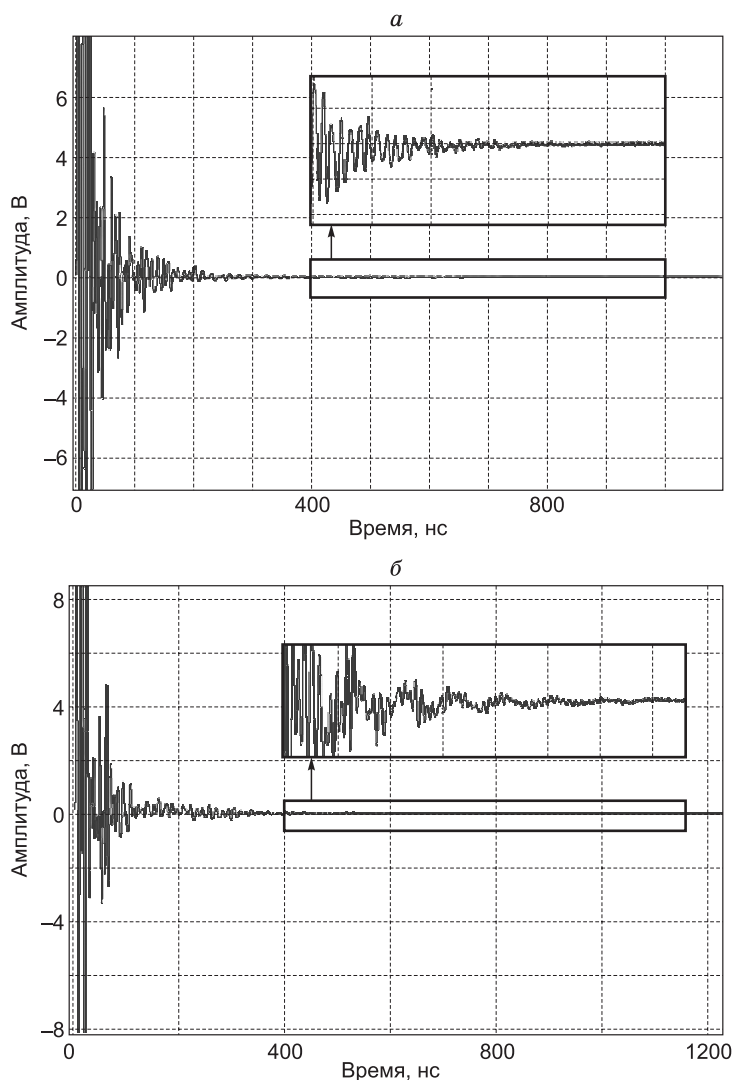
Рис. 10. СШП-сигнал, принятый лепестковой антенной метрового размера в начале (а) и конце (б) профиля.

показаны на рис. 9. При сравнении радарограммы с фрагментом геоэлектрического разреза можно видеть сходство в общих чертах этих двух картин.

Верхняя часть геоэлектрического разреза (см. рис. 9, а) до глубины 20—30 м характеризуется УЭС 30—50 Ом·м (суглинки). На радарограмме (см. рис. 9, б) довольно отчетливо просматривается слоистая структура подстилающей среды. По линиям синфазности можно выделить отражающие границы на временах 200 и 400 нс.

Сопоставляя радарограмму с геоэлектрическим разрезом (см. рис. 9, в), можно прийти к выводу, что отражающая граница на времени 400 нс соответствует геоэлектрической границе комплексов пород с УЭС 30—50 и 100—250 Ом·м на глубине 20—30 м. Комплекс низкоомных пород характеризуется высокоамплитудным сигналом. На временах более 600—800 нс меняется амплитудно-частотный характер радарограммы, при этом происходит смена геоэлектрических комплексов на разрезе сопротивлений.

Сигналы с антенны метрового диапазона для точек зондирования, расположенных на левом краю профиля, отчетливо выделяются над шумами на временах до 750 нс, а для точек справа по профилю — до 1100 нс (рис. 10), что соответствует проникновению георадарного импульса в толщу коры выветривания до глубины 30 и 44 м соответственно. При этом, согласно данным электротомографии, проводимость верхней части отложений, в значительной мере определяющая затухание георадарных сигналов, в начале профиля заметно выше, чем в конце.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе экспериментальной оценки возможностей сверхширокополосной георадиолокации при зондировании низкоомных геологических сред сделано сопоставление с данными классического георадиолокационного обследования и электротомографии.

По данным электротомографии, четвертичные глинистые породы (суглинки, глины) верхней части разреза до глубины 20—30 м обладают низким удельным электрическим сопротивлением 20—50 Ом·м. Низкоомный верхний слой является неблагоприятным фактором для применения традиционной георадиолокационной техники, ограничивающей глубинность исследований до нескольких метров (2—4 м) при использовании антенного блока с центральной частотой 150 МГц. При зондировании георадаром ОКО-2 область шума начинается со 150 нс, в то время как при измерениях СШП-комплексом — с 800—1000 нс.

В отличие от измерений дипольными антеннами, которые обычно применяются в отечественных и зарубежных георадарных системах, в СШП-комплексе используется monopольная и лепестковая антенны, в которых сильно подавлена прямая воздушная волна, что показано на примере полевого эксперимента. Экспериментальные исследования с переменной базой между приемной и передающей антеннами показали слабость электромагнитных волн, распространяющихся по воздуху по сравнению с поверхностной волной. Это, наряду с близостью коэффициента стоячей волны по напряжению к единице, есть подтверждение хорошего согласования антенн со средой и высокой помехозащищенностью

приемно-регистрирующего блока в целом. Энергия электромагнитного импульса поступает в подстилающую среду, а не распространяется по воздуху, являясь источником тяжелых синхронных помех.

Таким образом, увеличение глубинности СШП-георадиолокации низкоомных сред становится возможным при реализации ряда условий: использования специальных мощных генераторов электромагнитных импульсов — генераторов на дрейфовых диодах с резким восстановлением обратного напряжения, хорошего согласования приемных и передающих антенн со средой, повышения помехоустойчивости системы регистрации в целом, в частности, за счет снижения интенсивности воздушных волн.

ЛИТЕРАТУРА

Балков Е.В., Панин Г.Л., Манштейн Ю.А., Манштейн А.К., Белобородов В.А. Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения // Геофизика, 2012, № 6, с. 54—63.

Безродный К.П., Болтинцев В.Б., Ильяхин В.Н., Андрианов С.В. Мониторинг подземного пространства вперед забоя методом электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования на примере строящихся тоннелей в г. Сочи // Жилищное строительство, 2010, № 12, с. 40—44.

Биорадиолокация / Под ред. А.С. Бугаева, С.И. Ивашова, И.Я. Иммореева. М., Изд-во МГТУ, 2010, 396 с.

Бобачев А.А., Горбунов А.А. Двумерная электроразведка методом сопротивлений и вызванной поляризации: аппаратура, методики, программное обеспечение // Разведка и охрана недр, 2005, № 12, с. 52—54.

Болтинцев В.Б., Ильяхин В.Н., Черемисин А.А., Безродный К.П., Нагорный С.Я. Применение метода электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования при инженерно-геологических изысканиях // Инженерная геология, 2006, № 2, с. 72—76.

Васютинская Т.Ф., Кутолин В.А., Михайловский Д.В. Геологическое строение и полезные ископаемые. Материалы к государственной геологической карте СССР м-ба 1: 200 000. Лист N-44-XII. Новосибирск, ТГФ, 1959.

Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. М., Изд-во Моск. ун-та, 2004, 153 с.

Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Варенков В.В., Резников А.Е., Сахтеров В.И. Современные георадары серии «ГРОТ» для экологического мониторинга // Экологические системы и приборы, 2012, № 5, с. 1—3.

Вопросы подповерхностной радиолокации / Ред. А.Ю. Гринева. М., Радиотехника, 2005, 416 с.

Горностаева Е.С., Оленченко В.В., Потапов В.В. Строение Шадрихинского разлома (Правобережное Приобье) по данным аудиоманнитотеллурического зондирования // Материалы Международной научной конференции «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология». Новосибирск. 2014, с. 32—35.

Грехов И.В., Месяц Г.А. Полупроводниковые наносекундные диоды для размыкания больших токов // УФН, 2005, т. 175, № 7, с. 735—744.

Грехов И.В., Ефанов В.М., Кардо-Сысоев А.Ф., Шендерей С.В. Формирование высоковольтных наносекундных перепадов напряжения на полупроводниковых диодах с дрейфовым механизмом восстановления напряжения // Письма в ЖТФ, 1983, т. 9, № 7, с. 435—439.

Королев В.Ю. Вероятностно-статистические методы декомпозиции волатильности хаотических процессов. М., Изд-во Моск. ун-та, 2011, 512 с.

ОБЗОР-103. Измеритель комплексных коэффициентов передачи. <http://www.jais.ru/obzor103.html>.

Черемисин А.А., Болтинцев В.Б. Особенности широкополосной георадиолокации // Изв. вузов. Физика, 2012, т. 55, № 8/2, с. 12—19.

Шеннон К. Математическая теория связи // Работы по теории информации и кибернетике. М., Изд-во Иностран. лит., 1963, с. 243—332.

Эпов М.И., Миронов В.Л., Музалевский К.В. Сверхширокополосное электромагнитное зондирование нефтегазового коллектора. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2011, 114 с.

Annan A.P. Electromagnetic principles of ground penetrating radar / Ed. H.M. Jol. Ground penetrating radar: theory and applications. Elsevier Science, Oxford, UK, 2009, 508 p.

Carrière S.D., Chalikakis K., Sénéchal G., Danquigny C., Emblanch C. Combining electrical resistivity tomography and ground penetrating radar to study geological structuring of karst unsaturated zone // J. Appl. Geophys., v. 94, July 2013, p. 31—41, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.03.014>.

Civil engineering applications of ground penetrating radar. Springer transactions in civil and environmental engineering / Eds. A. Benedetto, L. Pajewski. Springer, Switzerland, 2015, 371 p.

Comas X., Terry N., Slater L., Warren M., Kolka R., Kristijono A., Sudiana N., Nurjaman D., Darusman T. Imaging tropical peatlands in Indonesia using ground penetrating radar (GPR) and electrical resistiv-

ity imaging (ERI): implications for carbon stock estimates and peat soil characterization // *Biogeosci. Discuss.*, 2015, v. 12, p. 191—229, www.biogeosciences-discuss.net/12/191/2015/, doi:10.5194/bgd-12-191-2015.

Dahlin T., Zhou B. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with ten electrode arrays // *Geophys. Prospect.*, 2004, № 52, p. 379—398.

Engineering geology for society and territory. Urban geology, sustainable planning and landscape exploitation / Eds. G. Lollino, A. Manconi, F. Guzzetti, M. Culshaw, P. Bobrowsky, F. Luino. Springer, Switzerland, 2015, v. 5, 1400 p.

Enrione R., Cocchi S., Naldi M. The combined use of different near surface geophysics techniques and geotechnical analysis in two case histories for the advanced design of underground works in urban environment: Rome Metro B and Torino-Ceres Railway // *Geol. Soc. Terr. Applied Geology for Major Engineering Projects*. Springer, Switzerland, 2015, v. 6, p. 1045—1048.

Fernandez Jr., A.L., Medeiros W.E., Bezerra F.H.R., Oliveira Jr., J.G., Cazarin C.L. GPR investigation of karst guided by comparison with outcrop and unmanned aerial vehicle imagery // *J. Appl. Geophys.*, 2015, v. 112, p. 268—278, doi: 10.1016/j.jappgeo.2014.11.017.

GeoScan32. Иллюстрированное руководство пользователя. Раменское, ЛОГИС, 2013, 132 с.

Goodman D., Piro S. GPR Remote sensing in archaeology. Springer, Berlin, 2013, 233 p.

Ground penetrating radar in sediments / Eds. C.S. Bristow, H.M. Jol. Geological Society. Special Publication, London, 2003, 330 p.

Ground penetrating radar / Ed. D.J. Daniels. The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 2004, 734 p.

Ground penetrating radar: theory and applications / Ed. H.M. Jol. Elsevier Science, Oxford, UK, 2009, 508 p.

Hirsch M., Bentley L. R., Dietrich P. A comparison of electrical resistivity, ground penetrating radar and seismic refraction results at a river terrace site // *J. Environ. Engin. Geophys.*, 2008, v. 13, № 4, p. 325—333.

Kullback S., Leibler R.A. On information and sufficiency // *The Annals of Mathematical Statistics*, 1951, v. 22, № 1, p. 79—86.

Li X., Hu Z., Li S., Cai Y. Anomalies of mountainous mining paddy in western China // *Soil Tillage Res.*, 2014, v. 145, p. 10—19.

Loke M.H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys, RES2DINV Manual, IRIS Instruments, 2009.

Luodes H., Sutinen H., Härmä P., Pirinen H., Selonen O. Assessment of potential natural stone deposits / Eds. G. Lollino, A. Manconi, F. Guzzetti, M. Culshaw, P. Bobrowsky, F. Luino // *Engineering geology for society and territory. Urban geology, sustainable planning and landscape exploitation*. Springer, Switzerland, 2015, v. 5, p. 243—246.

Mahmoudzadeh M.R., Francés A.P., Lubczynski M., Lambot S. Using ground penetrating radar to investigate the water table depth in weathered granites — Sardon case study, Spain // *J. Appl. Geophys.*, 2012, v. 79, p. 17—26, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.12.009>.

Neto P.X., Medeiros W.E. A practical approach to correct attenuation effects in GPR data // *J. Appl. Geophys.*, 2006, v. 59, p. 140—151.

Pepe P., Martimucci V., Parise M. Geological and geophysical techniques for the identification of subterranean cavities / Eds. G. Lollino, A. Manconi, F. Guzzetti, M. Culshaw, P. Bobrowsky, F. Luino // *Engineering geology for society and territory. Urban geology, sustainable planning and landscape exploitation*. Springer, Switzerland, 2015, v. 5, p. 483—487.

SIR: Ground penetrating radar data acquisition Unit — SIR-3000 – GSSI. <http://www.geophysical.com/sir3000.htm>.

Szalai S., Szarka L. On the classification of surface geoelectric arrays // *Geophys. Prosp.*, 2008, № 56, p. 159—175.

Ultrawideband radar. Applications and design / Ed. J.D. Taylor. CRC Press, Boca Raton- London- New York, 2012, 509 p.

Unexploded ordnance detection and mitigation. (NATO Science for Peace and Security, Series B_ Physics and Biophysics) / Ed. J. Byrnes. Springer, Dordrecht, Netherlands, 2008, 286 p.