

УДК 621.37  
DOI: 10.14489/td.2017.05.pp.054-060

## МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКОЛА ДЛЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «РЕГИСТРАЦИЯ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ РАДИОЛОКАТОРАМИ МАЛОЙ ДАЛЬНОСТИ»



**В. И. Матвеев,**  
канд. техн. наук,  
ЗАО «НИИИИ МНПО «Спектр»  
Москва, Россия  
E-mail: matveev@niin.ru

В статье излагаются основные достижения в новом перспективном направлении радиолокации по регистрации подповерхностных объектов на малой дальности. В качестве докладчиков выступили специалисты высокого уровня из России, США, Великобритании, Италии и Японии. Обсуждались принципы повышения технических характеристик радиолокаторов малой дальности и результаты их практического применения в различных областях.

**Ключевые слова:** конференция, радиолокаторы, задачи, докладчики, организации, страны.

V. I. Matveev (JSC RII MSIA «Spectrum», Moscow, Russia)

### INTERNATIONAL SCHOOL FOR YOUNG SCIENTISTS "REGISTRATION OF SUBSURFACE OBJECTS BY SHORT DISTANCE RADARS"

The article describes the main achievements in the new perspective direction of the radar for the registration of subsurface objects at short distance. The speakers were high-level professionals from Russia, USA, UK, Italy and Japan. Discussed the principles of improving the technical characteristics of short distance radars and the results of their practical application in various fields.

**Keywords:** conference, radars, objectives, speakers, organizations, countries.



Статья поступила в редакцию 28.02.2017

Received 28.02.2017

25 – 27 октября 2016 г. в МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва) состоялась Международная школа для молодых ученых «Регистрация подповерхностных объектов радиолокаторами малой дальности» [1].

Цель проведения международной школы – развитие фундаментальных и прикладных методов в области подповерхностной радиолокации для решения задач в таких областях экономики, как: строительство и инженерная геология, неразрушающий контроль конструкций различного назначения, обеспечение безопасности на особо охраняе-

мых объектах, устранение техногенных аварий, противодействие терроризму [2, 3] и др.

Работа международной школы-семинара молодых ученых была направлена на определение основных перспектив и формализацию научно-прикладных проблем, связанных с разработкой теоретических и инженерных основ в области подповерхностной радиолокации, а также консолидацию усилий молодых ученых, аспирантов, студентов, инженеров и специалистов, чьи интересы лежат в области методов, средств, технологий, систем об-

работки сигналов в подповерхностной радиолокации [4].

В рамках международной школы-семинара были проведены пленарные заседания с выступлениями известными зарубежными учеными мирового уровня, а также устными и стендовыми докладами молодых ученых, касающимися различных аспектов разработки научно-технических основ подповерхностной радиолокации.

Всего было заслушано 18 докладов, в том числе 10 – участников из России, 3 – из Италии, 2 – из США, по одному – из Великобритании, Японии и Казахстана.



**Сергей Иванович Ивашов, канд. техн. наук, начальник Лаборатории дистанционного зондирования МГТУ им. Н.Э. Баумана**

Проведение Международной школы для молодых ученых «Регистрация подповерхностных объектов радиолокаторами малой дальности» было организовано при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 15-19-30012 «Разработка новых методов регистрации, обработки и представления радиолокационных сигналов и изображений в подповерхностной мультистатической радиолокации».

Председатель организационного комитета – д-р техн. наук, проф., ректор МГТУ им Н. Э. Баумана Анатолий Александрович Александров; сопредседатель – д-р физ.-мат. наук, проф., член Президиума РАН, академик Александр Степанович Бугаев; руководитель программного комитета – канд. техн. наук, начальник Лаборатории дистанционного зондирования МГТУ им. Н. Э. Баумана Сергей Иванович Ивашов.

В программный комитет вошли зарубежные и российские специалисты: Prof. Timothy D. Bechtel – University of Pennsylvania, Franklin & Marshall College, Department of Earth & Environment, USA; Prof. Lorenzo

Capineri – University of Florence, Dept. Information Engineering, Italy; Dr. Francesco Soldovieri – Institute for the Electromagnetic Sensing of the Environment, Italy; Денис Александрович Охотников – заведующий кафедрой «Аналоговые и цифровые радиоэлектронные системы» Московского авиационного института, канд. техн. наук; Николай Павлович Семейкин – генеральный директор ООО «Логис», г. Раменское, Московская область; Леся Николаевна Анищенко – канд. техн. наук, Лаборатория дистанционного зондирования МГТУ им. Н. Э. Баумана; Андрей Викторович Журавлев – канд. физ.-мат. наук, Лаборатория дистанционного зондирования МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Первый пленарный доклад «История развития подповерхностной радиолокации и ее применения» сделал доцент Московского физико-технического института Н. П. Чубинский. Он рассказал об основных этапах становления широко востребованного направления классической радиолокации, связанного с обнаружением объектов в непрозрачных средах со средним и большим частотно зависимым затуханием.

Представленные им материалы не претендуют на полноту картины в данной научно-технической области как в России, так и за рубежом, но отражают видение автора и его коллег, работавших в Московском физико-техническом институте с конца 1950-х гг. Также в докладе кратко освещены неэлектрические (акустика, ближняя сейсмика) методы обнаружения объектов в грунтах, строительных конструкциях и т.п. Показано, что построение адекватных моделей систем обнаружения и создание их рабочих макетов невозможно без глубокого понимания физических свойств сред зондирова-



**Dr. Timothy D. Bechtel, Professor of Geosciences, University of Pennsylvania, Department of Earth & Environment, Franklin & Marshall College, USA**

ния в широком диапазоне частот. Это относится как к электромагнитным, так и акустическим методам. Активизация исследований в данной области была обусловлена необходимостью в создании устройств для обнаружения пластиковых мин, которые стали широко использоваться после войны. Приведены характеристики первых георадаров, применяющих радиоволновые методы и простейшие квазикогерентные сигналы.

Следующим шагом стало копирование классических радиолокаторов, использующих импульсные сигналы и обеспечивающих разрешение по дальности. В обоих случаях могли быть применены только простейшие средства регистрации, не позволяющие проводить глубокую обработку сигналов. На третьем этапе (1980-е гг.) произошел революционный скачок технического облика георадаров, связанный с бурным развитием электроники, вычислительной микропроцессорной техники, появлением ноутбуков.

В последнее десятилетие, в связи с бурным внедрением новых методов обработки волновых полей, растет число многоканальных (многопозиционных)



**Денис Александрович Охотников, канд. техн. наук, заведующий кафедрой «Аналоговые и цифровые радиоэлектронные системы» Московского авиационного института**

конструкций, которые резко увеличили продуктивность регистрации сигналов и дают в реальном масштабе времени трехмерные картины расположения объектов поиска.

Dr. Timothy D. Bechtel (Professor of Geosciences, University of Pennsylvania, Department of Earth & Environment, Franklin & Marshall College, USA) в докладе «Ground Penetrating Radars and other Geophysics Devices Applied to Archaeology» («Георадары и другие геофизические устройства, применяемые для археологии») рассказал об археологических раскопках, как правило, требующих кропотливого ручного труда. Геофизики могут помочь решить многие проблемы, применяя неразрушающие геофизические методы обеспечения быстрого и эффективного поиска потенциальных археологических объектов. Геодезическое исследование и картографирование могут помочь археологам различать культурные или бесплодные зоны, позволяя получить максимальные культурные сведения при ограниченных бюджете и времени.

Радарная геодезия и картография помогают в полной мере разграничить такие объекты, как стены, дороги, водоводы и тун-

нели, что не может быть эффективно или правильно определено методами простукивания.

Если места уже известны, то более подробная 2D- или 3D-визуализация может предоставить более полную информацию о ненарушенных зонах. Некоторые археологические памятники (сакральные или церемониальные) не могут быть раскопаны. В этих случаях геофизики могут предложить единственный метод обнаружения, документирования и интерпретации.

В настоящее время археологи организуют спасательные операции, выявляя и документируя потенциальные археологические ресурсы до разрушения их строительными и коммунальными службами. Применение радаров ускоряет процессы исследований и получения геофизических изображений. Доклад иллюстрировался многочисленными примерами становищ, поселков и укреплений; захоронений в возрасте от 2 до 2000 лет; костровищ и очагов; затонувших кораблей; капсул и особых камней в исторических зданиях и т.д.

Заведующий кафедрой «Аналоговые и цифровые радиоэлектронные системы» Московского авиационного института канд. техн. наук Д. А. Охотников в докладе «Принципы построения короткоимпульсных радиолокаторов» привел общие сведения о сверхширокополосных короткоимпульсных (КИ) радиолокаторах, их характеристиках и принципах построения; рассмотрел способы обзора пространства и измерения координат целей; представил основные технические характеристики и способы построения передающих устройств КИ РЛС.

Особое внимание автор уделит анализу влияния вида зондирующего сигнала на разрешающую способность и точность измерения координат, привел

структурные схемы тракта приема и выделения сигналов, способы приема и обработки сигналов РЛС на фоне помех; особенности их технической реализации; принципы построения устройств отображения радиолокационной информации.

В докладе Numerical modeling of Ground Penetrating Radar using the gprMax Finite-Difference Time-Domain simulator участник семинара из Великобритании Dr. Craig Warren (The University of Edinburgh, UK) поделился опытом использования численных методов моделирования в подповерхностной радиолокации. Это ускорило научные исследования и сделало практику гораздо более распространенным явлением. Численное моделирование стало полезным как для специалистов, так и для исследователей, позволяя им тестировать и разрабатывать новые идеи для обработки, визуализации и интерпретации данных. Численное моделирование также является ценным учебным пособием для обучения инженеров и ученых о распространении электромагнитных волн в сложных средах.

В докладе кратко изложены основные понятия конечных разностей во временной области, метода вычислительной электродинамики и нового программного обеспечения для моделирования.

В докладе «Голографические подповерхностные радиолокаторы и их применение» С. И. Ивашов (начальник Лаборатории дистанционного зондирования МГТУ им. Н. Э. Баумана) представил подробную информацию о новых разработках лаборатории, и в частности о голографических подповерхностных радиолокаторах и их применении. Традиционно на практике наиболее часто используется импульсный радиолокатор, излучающий, как правило, один период сину-





**Dr. Craig Warren (The University of Edinburgh, UK)**

соидального сигнала. К этому типу относятся практически все производимые серийно в настоящее время подповерхностные радиолокаторы.

Основным преимуществом импульсных локаторов является высокая проникающая способность их сигнала в зондируемой среде за счет применения переменного коэффициента усиления в приемнике, а также возможность непосредственного измерения глубины подповерхностного объекта по измерению времени запаздывания отраженного сигнала. К недостаткам импульсных локаторов следует отнести широкий спектр излучаемого сигнала, имеющего сплошной характер, что может привести к интерференции с другими СВЧ-устройствами (системы глобального позиционирования, различные типы связи и т.д.) и, как следствие, к конфликту с существующими нормами и правилами. В качестве примера можно привести известные противоречия, которые возникали в США из-за требований Федеральной комиссии по связи, согласно которым фактически запрещается использование подповерхностных локаторов.

Вместе с тем известно, что кроме импульсных радиолокаторов в подповерхностной радиолокации исследовались локаторы с непрерывным излучением, к которым относятся локаторы с частотной модуляцией, локаторы со ступенчатым изменением частоты, а также голографические подповерхностные радиолокаторы.

Локатор с линейной частотной модуляцией излучает непрерывный сигнал, частота которого меняется по линейному закону (график изменения частоты по времени имеет пилообразный вид). В смесителе отраженный от объекта сигнал перемножается с опорным сигналом, а на выходе смесителя на разностной частоте получается сигнал, частота которого зависит от расстояния до зондируемого объекта.

Локаторы со ступенчатым изменением частоты излучают сигнал на нескольких когерентных частотах. Измерение амплитуд и фаз отраженных сигналов для всех излучаемых частот дает возможность определить глубину залегания объекта в среде.

Рассматриваемый в данном докладе голографический подповерхностный радиолокатор является также локатором с непрерывным излучением, который получил свое название из-за метода его использования – регистрации интерференционной картины (радиоголограммы) опорной и отраженной от объекта волн на некотором участке зондируемой поверхности. При этом источником опорного сигнала может быть отражение от поверхности раздела, прямая электромагнитная связь между передающей и приемной антеннами либо направленный ответвитель сигнала от генератора к приемнику. Получаемые с помощью такого радиолокатора изображения (радиоголограммы) похожи на оптические голограммы, так



**Mr. Masaharu Inagaki, Director and Chief Geophysicist, Walnut Ltd., Japan**

как на них заметна интерференционная структура, но при этом количество наблюдаемых интерференционных экстремумов значительно меньше из-за поглощения электромагнитных волн в зондируемой среде и относительно узкой диаграммы направленности антенны.

Отметим, что в течение длительного времени считалось, что из-за ограничений, связанных с сильным поглощением в зондируемых средах, данный тип радиолокаторов вряд ли будет широко использоваться. Однако данный тип георадара активно применяется в таких областях, как диагностика строительных конструкций и композиционных материалов; обнаружение мин в грунте; обследование объектов культурного наследия.

Участник семинара из Японии Mr. Masaharu Inagaki, Director and Chief Geophysicist, Walnut Ltd., выступил с докладом Application of GPR to tunnel surveys and the Engineering judgement.

Докладчик отметил, что Япония горная страна, именно поэтому в ней много разновидностей тоннелей – это дороги, спецтоннели, железнодорожные тоннели, тоннели для выработки электроэнергии. Георадар был впервые применен для обследования тоннеля три десятилетия назад в Японии. Автор подчерк-



**Prof. Lorenzo Capineri, University of Florence, Dept. Information Engineering, Italy**

нул, что радар, изобретенный для обнаружения самолетов, получил новое расширение, уже в другой среде – не в воздухе, а в земле. Цель – получить 3D-позиции труб. Администраторы тоннелей хотят знать структуру за ограждениями, потому что отраженные волны доносят больше информации о структурах и объектах за

преградами. Докладчик привел примеры анализа по обследованию конкретных тоннелей.

Prof. Lorenzo Capineri, University of Florence, Dept. Information Engineering, Italy в докладе Electromagnetic modeling for ground penetrating radar рассказал о работах в Италии. Подповерхностные изображения с помощью высокочастотных импульсных георадаров давно изучены и применяются в таких областях, как инженерно-геологические, экологические и строительные технологии. В последнее время сверхширокополосные радарные технологии стимулировали новые исследования в аэрокосмической и медицинской областях. Однако распространенной проблемой остается обнаружение мелких целей на глубине менее 20 см из-за интерференции передаваемых и принимаемых импульсов, что требует сложных методов реконструкции изображения. Решением этой проблемы является голографический ра-

диолокатор, установленный на роботизированный сканер, который создает точные сетки пространственных положений. Голографические радары, работающие на частотах 2 и 4 ГГц, обеспечивают снимки с высоким пространственным разрешением в различных подземных сооружениях. В заключение автор доклада перечислил требования к точности пространственной дискретизации радиолокационных измерений, которые должны составлять малые доли длины волны. Кроме того, проведено сравнение методов пространственной привязки при обнаружении объектов.

Доклад Sub-terahertz photonics and subsurface imaging профессора А. А. Вертий (Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Казахстан) посвящен фотонике миллиметрового диапазона длин волн, источникам миллиметровых волн и томографии в миллиметровом диапазоне длин волн. Это прежде всего открытые резонаторы, многослойные интерферометры и открытые волноводы, работающие в диапазонах от 35 до 115 ГГц, высококогерентные генераторы дифракционного излучения миллиметрового диапазона.

В качестве одного из применений миллиметрового диапазона длин волн рассматривается томографический метод, позволяющий получать трехмерные изображения объектов, скрытых границей раздела двух сред. Приводятся примеры успешного применения этого метода для детектирования опасных порошков в почтовых конвертах, скрытого оружия и др. Представлены также изображения трехмерных дефектов внутри радиопрозрачных композиционных материалов.

Начальник отдела электроразведки ООО «Логис» (г. Ра-



**Слева-направо: Antonina Chaban, University of Padua, Italy, PhD student; Ms. Felicia Bechtel, President of Envirosan Inc., USA; Dr. Timothy D. Bechtel, Professor of Geosciences University of Pennsylvania, Department of Earth & Environment, Franklin & Marshall College, USA; Сергей Иванович Ивашов, канд. техн. наук, начальник Лаборатории дистанционного зондирования МГТУ им. Н. Э. Баумана**





**Коллективная фотография участников международной школы (25 – 27 октября 2016 г.)**

менское, Московская область) М. П. Ширококов выступил с докладом «Разработки перспективных поисковых приборов обнаружения мин и самодельных взрывных устройств (IED) для операций по гуманитарному разминированию». Автор представил информацию по широкому ряду новых поисковых приборов разработки и производства ООО «Логис». В них используются два разных физических метода – радиолокация и индукционный металлодетектор, что позволяет обнаруживать различные мины и самодельные взрывные устройства как в металлических, так и пластиковых корпусах, а также решать другие поисковые задачи при проведении спецопераций по гуманитарному разминированию.

Дочерняя компания «Логис-Геотех» занимается производством и разработкой широкого спектра поискового и досмотрового оборудования для таможенных структур, специалистов Следственного комитета РФ, а также разработкой нового анти-террористического оборудования для силовых структур. Так, например, в ФТС РФ принят на вооружение поисковый комплект «Зонд-М» на основе георадара с

двумя антенными блоками АБ-700 и АБ-1200.

Поисковый комплект предназначен для оперативного осмотра грузов на предмет обнаружения контрабандных вложений, тайников, схронов, людей в укрытиях, ВУ, в том числе в пластиковых корпусах и бескорпусных. Интеллектуальные георадары «ОКО» позволяют комплексировать георадар с другими датчиками и устройствами. Так, например, создан комбинированный прибор – подповерхностный обнаружитель ППО-2 для обнаружения взрывных устройств в металлических и пластиковых корпусах и проводных линиях. Прибор совмещает в себе металлоискатель и георадар с антенным блоком АБ-1200. Компания «Логис-Геотех» разрабатывает комбинированный широкозахватный миноискатель для инженерной разведывательной машины. Поисковые приборы «Логис-Геотех», радар-обнаружитель «РО-400» и подповерхностный обнаружитель «ППО-2» приняты на вооружение ФСБ РФ.

Приведенный в данном докладе обзор узкоспециализированных программно-аппаратных комплексов, использующих в

своей основе георадары с различными частотами, наглядно иллюстрирует перспективы их широкого внедрения и применения для решения различных задач. Правоохранительные органы и подразделения специального назначения смогут получать критически важную информацию об искомом объекте, увеличить уровень безопасности и мобильности проведения операций по гуманитарному разминированию.

Свой доклад «Принципы повышения глубины зондирования и опыт применения георадаров «Лоза» старший научный сотрудник Института земного магнетизма (ИЗМИРАН) П. А. Морозов (г. Троицк, Московская область) посвятил современным низкочастотным георадарам для успешной работы в области практической геологии, которые должны обладать глубиной зондирования до 200 – 300 м в высокоомных грунтах. Достижение таких результатов возможно только с учетом следующих принципов и конструктивных решений:

– низкочастотный георадар должен обладать максимально возможной мощностью. Передатчики георадара «Лоза-Н»

коммутируют на антенну 15 – 20 кВ в импульсе;

– антенны георадара должны быть нерезонансными. Оптимальной конструкцией антенны является резистивно нагруженные полуволновые диполи («антенны Ву-Кинга»);

– приемник георадара должен обеспечивать оцифровку отраженного сигнала в динамическом диапазоне более 120 дБ;

– георадар должен быть оснащен антеннами с центральной частотой 10 – 25 МГц, обеспечивающих зондирование на частотах с существенно меньшим затуханием в среде, чем на частотах классических георадаров. В комплект георадара «Лоза-Н» входят антенны 6, 10, 15 и 30 м длиной.

В докладе представлены особенности конструкции низкочастотных георадаров и приведены разрезы, иллюстрирующие их возможности на примере хорошо узнаваемых геологических структур: карстов, провалов, грабенов, даек, кварцевых жил, палеорельефа, подземных ходов на глубинах 50 – 60 м.

В остальных выступлениях были освещены темы оптимизации конструктивных и программных решений при разра-

ботке современных георадаров, а также новые направления их практического применения, в частности при обнаружении людей за преградами по движению и дыханию, а также в медицинских приложениях [5].

Школа показала, что идет перспективное развитие георадарных технологий, они находят широкое применение на практике и, конечно, продолжается успешное международное сотрудничество в этой области.

### Библиографический список

1. **Международная школа** для молодых ученых «Регистрация подповерхностных объектов радиолокаторами малой дальности» / МГТУ им. Н. Э. Баумана, 25 – 27 октября 2016 г. URL: <http://school.rslab.ru/?lang=ru&fn=main>

2. **Матвеев В. И.** Радиоволновой контроль: учеб. пособие / под общ. ред. В.В. Ключева. М.: ИД «Спектр», 2011. 184 с.

3. **Матвеев В. И.** Антитеррористическая диагностика электромагнитными средствами радиоволнового диапазона // Контроль. Диагностика. 2006. № 9. С. 21 – 30.

4. **Матвеев В. И., Артемьев И. Б.** Научно-техническая конференция «Радиолокационные системы малой и сверхмалой дальности» // Территория NDT. 2014. № 2. С. 34 – 36.

5. **Бажанов А. С., Дутышев И. Н., Марчук В. Н. и др.** Радары для обнаружения людей // XX Всерос. науч.-техн. конф. по неразрушающему контролю и технической диагностике: тезисы докладов. Москва, 3 – 6 марта 2014 г. М.: ИД «Спектр», 2014. С. 443 – 445.

### References

1. *International school for young scientists «Registration of subsurface objects with short-range radars»*. MGTU im. N.E. Bauman, 25 – 27 October 2016. Available at: <http://school.rslab.ru/?lang=ru&fn=main>

2. Klyuev V. V. (Ed.), Matveev V. I. (2011). *Radiowave testing*. Moscow: Izdatel'skii dom «Spektr».

3. Matveev V. I. (2006). Antiterrorist diagnostics with electromagnetic testing methods of radio wave range. *Kontrol'. Diagnostika*, (9), pp. 21 – 30.

4. Matveev V. I., Artem'ev I. B. (2014). Scientific and technical conference «Radar systems of low and ultralow range». *Territoria NDT*, (2), pp. 34-36.

5. Bazhanov A. S., Dutshev I. N., Marchuk V. N. et al. (2014). *Radars for human detection*. XX All-Russian scientific and technical conference on nondestructive testing and technical diagnostics: proceedings. Moscow, (pp. 443-445). 3 – 6 March 2014. Moscow: Izdatel'skii dom «Spektr».