

60+ лет развития подповерхностной радиолокации в СССР и России: от картирования антарктических льдов до гуманитарного разминирования

С.И. Ивашов

Московский Государственный Технический Университет им Н.Э. Баумана

Лаборатория дистанционного зондирования

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

E-mail: sivashov@rslab.ru

В данной работе описана краткая история исследований и разработок в области поверхностной радиолокации, начиная с 60-х годов в СССР и заканчивая современностью в России и соседних государствах, образовавшихся после его распада. Отмечается выдающаяся роль, которую сыграли в начальный период развития этой технологии проф. М.И. Финкельштейн и его коллеги. Их исследования оказали существенное влияние на последующие разработки георадаров различного назначения на пространстве бывшего СССР. В работе особо исследовано развитие техники голографических подповерхностных радиолокаторов в современной России, которое получило признание в мире в области неразрушающего контроля диэлектрических и композиционных материалов, при обследовании объектов культурного наследия, гуманитарном разминировании и ряде других областей. В заключительной части описаны основные производители импульсных подповерхностных радиолокаторов на пространстве бывшего СССР.

Ключевые слова: история георадаров в СССР и России, исследования и разработки, неразрушающий контроль материалов и конструкций, диагностика морских и пресноводных льдов, гуманитарное разминирование.

60+ years of subsurface radar development in the USSR and Russia: from mapping Antarctic ice to humanitarian demining

S.I. Ivashov

Bauman Moscow State Technical University, Remote Sensing Laboratory

5, 2nd Baumanskaya str., Moscow, 105005, Russia

This paper describes a brief history of research and development in the field of surface radar, starting from the 1960s in the USSR and ending with the present day in Russia and neighboring states that formed after its collapse. The outstanding role played in the initial period of development of this technology by Prof. M.I. Finkelstein and his colleagues is noted. Their research had a significant impact on subsequent developments of ground penetrating radars for various purposes in the former USSR. The paper specifically examines the development of holographic subsurface radar technology in modern Russia, which has received worldwide recognition in the field of non-destructive testing of dielectric and composite materials, in the survey of cultural heritage sites, humanitarian demining and a number of other areas. The final part describes the main manufacturers of pulsed subsurface radars in the former USSR.

Keywords: history of ground penetrating radars in the USSR and Russia, research and development, non-destructive testing of materials and structures, diagnostics of sea and freshwater ice, humanitarian demining.

Введение

В радиолокационной технике существует особое направление исследований, связанное с исследованием оптически непрозрачных диэлектрических сред, но частично проницаемых для электромагнитных волн в радио и СВЧ диапазонах на частотах от 10 МГц до 10 ГГц. К таким средам относятся почва, горные породы,

пресный и морской лед, строительные конструкции и многие конструкционные материалы и композиты. В этих средах электромагнитные волны подвержены затуханию, иногда очень сильному, но при этом сохраняется возможность регистрации отраженного сигнала от неоднородностей, расположенных в обследуемой среде. Преимущество радиолокационного зондирования сред, например, перед рентгеновским, заключается в возможности исследования среды при одностороннем доступе к ней (т. е. при наблюдении только отраженного сигнала). Этот случай особенно актуален при исследовании почвогрунтов и подземных сооружений. Многие наземные здания и инженерные сооружения также не допускают двустороннего доступа с тем, чтобы регистрировать сигнал «на просвет». Это открывает возможность использовать такие радары как средства неразрушающего контроля. Радары такого типа получили в отечественной научной литературе различные названия, например, подповерхностный локатор. Стоит отметить, что в русскоязычной литературе также часто используется термин георадар. Это связано с широким применением этой технологии в геофизических исследованиях. В англоязычной литературе получила широкое распространение аббревиатура GPR от Ground-Penetrating Radar, которая обычно используется для обозначения всего класса поверхностных радиолокаторов. Часто используется также термины subsurface radar или surface-penetrating radar. Термин Ground-Penetrating Radar по смыслу гораздо уже последних, но научная традиция исторически отдает предпочтение этому общепринятому сокращению - GPR.

Начало георадарных исследований в СССР

Первые эксперименты по практическому применению подповерхностной радиолокации в СССР были предприняты в Антарктиде Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом в 1966 г. с использованием разработанной в конце Отечественной войны морской радиолокационной станции (РЛС) ГУЮС-1М4 (рабочая частота 214 МГц, $\lambda = 140$ см, точность определения дальности 120 м). Через два года эта РЛС была установлена на борту самолета Ил-14, что обеспечило возможность исследования обширных пространств континента [1], [2], рис. 1. Целью этих работ было измерение толщины ледового щита и определение рельефа подстилающей материковой поверхности. Одним из наиболее значимых результатов радиолокационного зондирования в Антарктиде было обнаружение британскими исследователями в 1993 г. подлёдного озера Восток, расположенного под одноименной российской полярной станцией на глубине 3950 м ниже поверхности ледникового щита [3].

То обстоятельство, что исследования были начаты именно в Антарктиде неудивительно, т.к. пресноводный лёд практически прозрачен в радиодиапазоне, что обеспечивает большие глубины зондирования, составляющее несколько километров. Так, максимальная толщина льда в Антарктиде по результатам геофизических измерений достигает 4800 м. В дальнейшем измерения были продолжены с уже специально разработанной подповерхностной РЛС-60-67, работающей на частоте 60 МГц. Переход на более низкие частоты по сравнению с РЛС ГЮИС объясняется тем, что с уменьшением частоты уменьшается и затухание, что позволяет увеличить глубину зондирования. В тоже время разрешение по глубине определяется длительностью зондирующего импульса, которая у нового поколения РЛС был существенно короче [2].

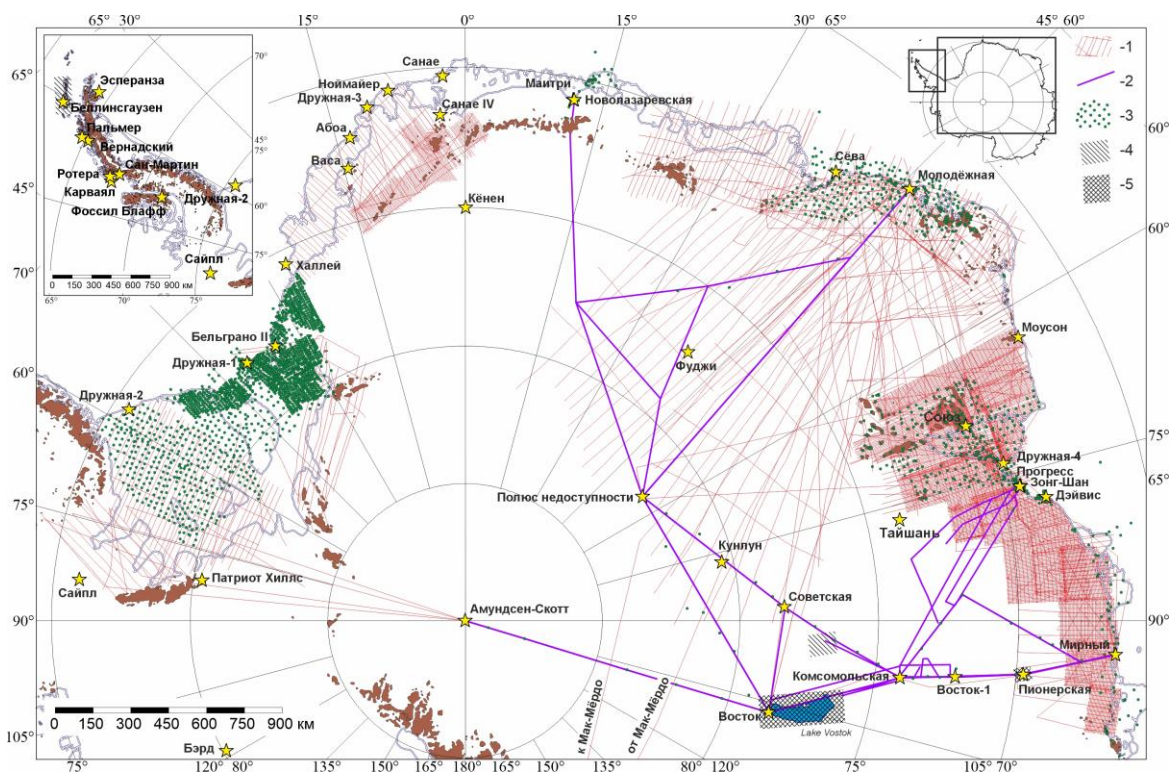


Рис. 1. Трассы полётов и расположение исследовательских станций в Антарктиде, а также расположение подледного озера под станцией Восток [2]

Очевидный успех этих работ дал импульс к разработке подповерхностных РЛС, предназначенных для обследования сред с потерями, иногда достаточно большими. Начало подобных исследований в области подповерхностной радиолокации в Советском Союзе в 70-80-е годы неразрывно связано с именем выдающегося ученого, лауреата Государственной премии СССР, профессора Моисея Ионовича Финкельштейна (1922 – 1992 гг.), работавшего в Рижском краснознаменном институте инженеров гражданской авиации (РКИИГА) в Латвии. В то время Латвия была частью Советского Союза.

В начальный период основным мотивом послужила необходимость дистанционного измерения толщины морского льда с помощью бортовых приборов самолета. Задача, которая в то время имела первостепенное значение в СССР, не потеряла своё значение и сейчас в силу необходимости обеспечения судоходства в Арктике. Ввиду особой важности этот маршрут имеет собственное название — Северный морской путь (СМП). Эти исследования привели к созданию в 80-х годах бортовой РЛС «Акварин». Данная РЛС была успешно испытана во льдах Арктики на СМП. За её разработку и исследования в области подповерхностной радиолокации М.И. Финкельштейну и его коллегам в 1984 году была присуждена Государственная премия СССР, рис. 2. Однако из-за распада СССР это направление работ не получило дальнейшего развития и, фактически, было прекращено.

Аналогичные усилия в РКИИГА были предприняты для разработки приборов, способных измерять толщину пресноводного льда на реках и озерах. Актуальность данных исследований была связана с необходимостью обеспечения безопасности движения транспортных колонн в Сибири в зимний период, где дорожная сеть крайне разрежена, а мосты и переправы через водные преграды во многих местах отсутствуют. Причем автомобильный транспорт часто передвигался по льду замерзших рек и озер, т.к. сухопутные пути были зачастую непроходимы. Другой проект РКИИГА по

геофизическим радарам для приповерхностного зондирования грунта был начат в 1972 г. В эти годы были предложены и разработаны основы построения георадаров и обработки регистрируемых сигналов. Исследования М.И. Финкельштейна и его учеников оказали исключительное влияние на последующие работы в этой области в СССР, а затем и в России. Этот период ознаменовался публикацией нескольких статей и книг, которые оказали большое влияние на последующие исследования, связанные с георадарами в Советском Союзе [4] - [10].



Рис. 2: Проф. М.И. Финкельштейн (в центре) и его коллеги по РКИИГА В.Г. Глушнев и Е.И. Лазарев в 80-е годы после получения им Государственной премии СССР

Необходимо отметить, что в этот же период были выполнены исследования Ю.И. Лещанским и его коллегами в Московском физико-техническом институте по исследованию электро-физических свойств грунтов различного состава, которые дали ценную информацию для интерпретации экспериментальных данных регистрируемых подповерхностными радиолокаторами [46], [47].

Переход от аналоговых к цифровым устройствам

Первые разработанные в РКИИГА георадары были крайне несовершенны и требовали длительной обработки сигналов в лаборатории. Первоначальный аналоговый сигнал георадара записывался на катушечный магнитофон, затем с помощью осциллографа и оптической системы сигнал радиолокатора регистрировался на фотопленке, которая требовала мокрой проявки и последующей фотопечати. Длительность и сложность этой процедуры исключала возможность анализа информации непосредственно на месте измерений с последующей коррекцией условий эксперимента. Сложность этого процесса обуславливалась отсутствием в СССР в это время необходимых средств отображения информации. Схематично этот процесс, все стадии которого были полностью аналоговыми, представлен на рис. 3.

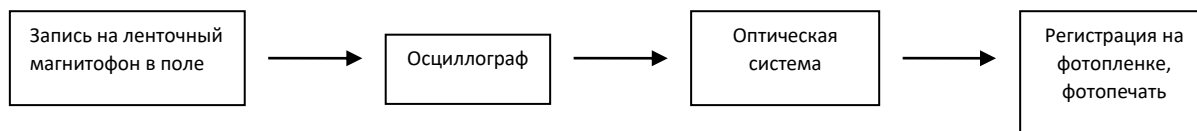


Рис. 3. Схема регистрации сигналов и отображения информации подповерхностного радиолокатора

Более того, ранние прототипы георадаров были достаточно примитивными, словно созданными радиолюбителями. Несомненно, эти обстоятельства сдерживали внедрение георадарных технологий в широкую практику геофизических исследований. Прорывом первой половины 80-х годов стало появление первого промышленного подповерхностного радиолокатора YL-R2, созданного японской компанией OYO [11], рис. 4. Это устройство, хотя и было по-прежнему аналоговым, позволяло получать информацию в реальном масштабе времени непосредственно на месте проведения измерений со встроенных принтеров, а при необходимости сразу повторять измерения. Появление этого устройства на рынке оказало существенное влияние на дальнейшее развитие техники подповерхностной радиолокации не только в СССР, но и во всем мире.

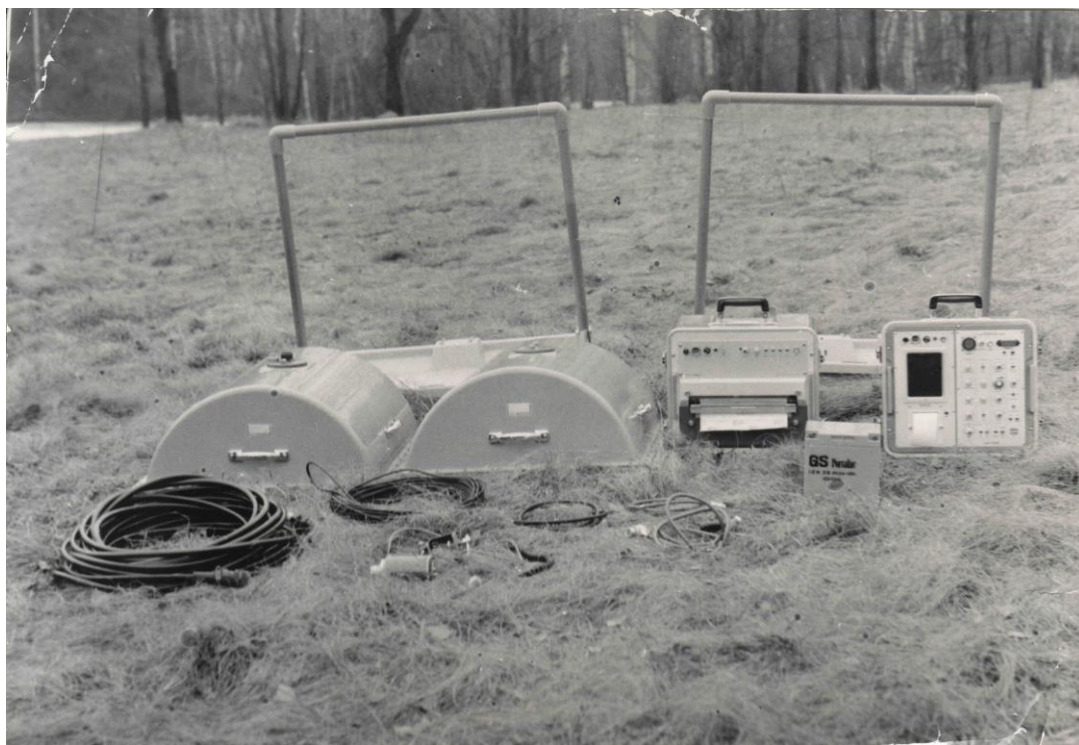


Рис. 4. Подповерхностный радиолокатор YL-R2 производства корпорации OYO, Япония

В 80-е годы в СССР начала широко внедряться цифровая обработка сигналов с помощью аналого-цифровых преобразователей. Это буквально произвело революцию во всей области подповерхностной радиолокации, позволив создавать инструменты с отображением информации в реальном масштабе времени.

В это же время появились электронные компоненты, позволяющие генерировать и регистрировать все более короткие импульсы, что в свою очередь привело к уменьшению размеров антенн и улучшению пространственного разрешения как по глубине, так и в плоскости зондирования. Тогда же в СССР, как и во всем мире, возник интерес к использованию георадаров для обнаружения мин, закопанных в грунт.

Эксперименты по регистрации СВЧ-изображений мин в грунте

Военные конфликты во всем мире характеризуются широким применением как противопехотных, так и противотанковых мин. Начиная с 1960-х годов, значительная часть установленных в грунт мин имела пластиковые корпуса, а некоторые почти не имели металлических частей, что затрудняло их обнаружение металлодетекторами, которые были главным техническим инструментом саперов. Основная угроза широкого распространения мин происходит не столько для воюющих сторон, которые обычно имеют средства и опыт для борьбы с ними, сколько для гражданского населения во время и главным образом после окончания конфликта. Это потребовало разработки новых эффективных средств разминирования, которые позволили бы повысить производительность, а также снизить стоимость этих работ и потери среди саперов. Снижение стоимости разминирования особенно важно при ликвидации последствий военных конфликтов, при так называемом гуманитарном разминировании. Учитывая остроту этой проблемы в мире, для её решения потребовались значительные усилия международного научного сообщества [12], включая их координацию на уровне ООН. Информация о деятельности её подразделения по гуманитарному разминированию UNMAS приведена в [13].

Основной проблемой, возникающей при разминировании, является высокий уровень ложных тревог при использовании стандартных инструментов разминирования, включая георадары. Одним из способов их снижения на фоне отражений от неоднородностей грунта и сторонних объектов могла бы стать возможность видеть форму и размеры заглублённого объекта.

Во второй половине 80-х годов в Лаборатории дистанционного зондирования, информационный сайт которой находится в [14], было предложено использовать радиолокационные технологии для получения СВЧ-изображений мин в плоскости зондирования земной поверхности. Экспериментальная установка для регистрации таких изображений, разработанная сотрудниками лаборатории, приведена на рис. 5. Устройство представляло собой линейную решетку из нескольких датчиков с рабочей частотой 600 МГц, которая была смонтирована на двумерном сканере.

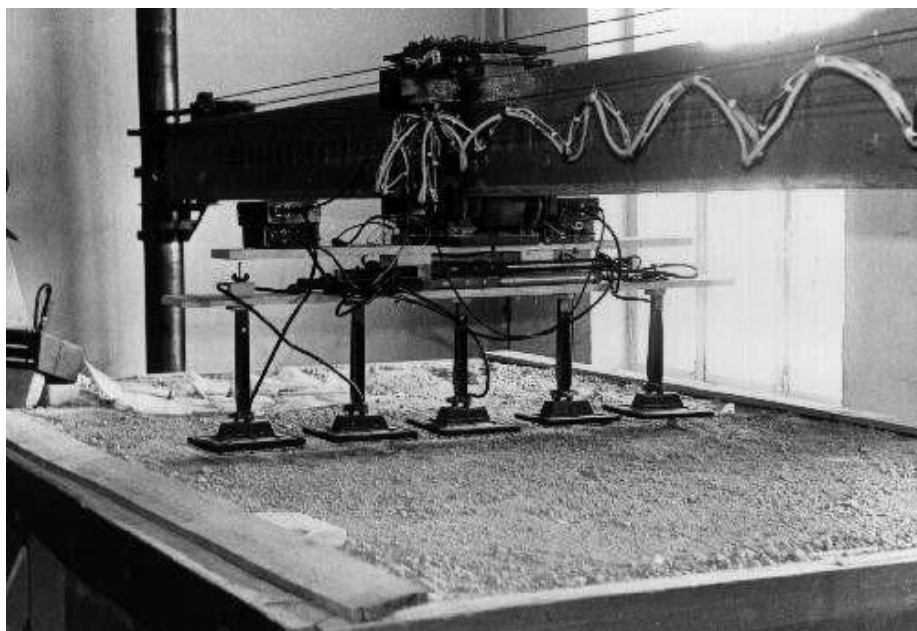


Рис. 5. Экспериментальная установка, предназначенная для регистрации СВЧ-изображений мин в грунте

В качестве объектов обнаружения использовались итальянские и советские противотанковые мины в пластиковых и металлических корпусах. Итальянская мина с пластиковым корпусом изображена на рис. 6. Одно из таких полученных радиоизображений показано на рис. 7. На нем видны СВЧ-изображения двух противотанковых мин (с металлическим и пластиковым корпусом) в центре пробного минного поля, кусок металлической трубы в слева, металлическая пластина в правом нижнем углу и кирпич в правом верхнем. Левое радиоизображение мин относится к mine в металлическом корпусе, а правое – пластиковом.

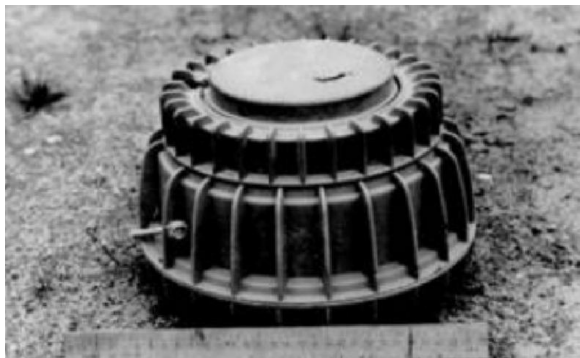


Рис. 6. Итальянская мина TS-6.1 с пластиковым корпусом

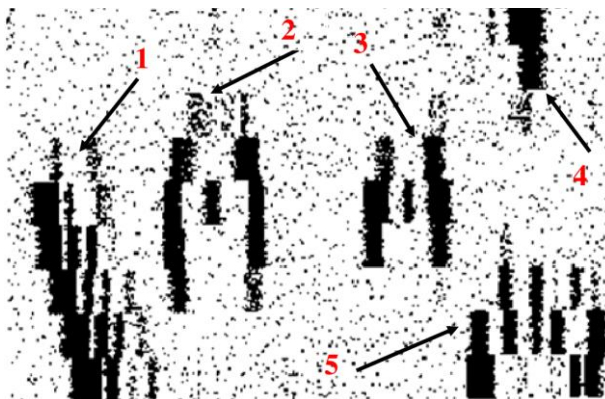


Рис. 7. СВЧ-изображение тестового поля:
1 - отрезок металлической трубы;
2 – противотанковая мина в металлическом корпусе;
3 - противотанковая мина пластиковом корпусе;
4- закопанный кирпич;
5- алюминиевая пластина

Подобные изображения, зарегистрированные в 1990 году, были получены, по-видимому, впервые в мире. Для согласования необходимых разрешений на публикацию и представления этих результатов в 1998 г. на международной конференции по гуманитарному разминированию MD'98 в Эдинбурге, Великобритания [12], потребовалось несколько лет. Доклад на конференции MD'98 [15] вскоре был перепечатан в журнале IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine [16], что подчеркивало новизну и важность представленной информации.

В Советском Союзе возможности международного научного сотрудничества были строго ограничены не только по политическим соображениям, но и по причине всеобщей секретности. В современной России эти ограничения в основном сняты, а в 90-х начали публиковать почти все, что угодно. Учитывая, что задача гуманитарного разминирования носит международный характер, сотрудники Лаборатории смогли быстро установить контакты с учёными других стран и начать совместные исследования в этой области [17] - [20].

Исследование и разработка голографических подповерхностных радиолокаторов

Еще одним научным направлением, которое начало развиваться в Лаборатории в середине 90-х годов, стало создание голографических подповерхностных радиолокаторов, предназначенных для обследования строительных конструкций и неразрушающего контроля композиционных материалов, которые широко используются в аэрокосмической промышленности [21] - [23]. Необходимо отметить, что голографические подповерхностные радиолокаторы следует рассматривать, как

отдельный вид всего класса подповерхностных радиолокаторов, т.к. они предназначены для получения радиоголограмм объектов, помещенных в оптически непрозрачную среду [24]. Для этих целей был создан малогабаритный голографический подповерхностный радиолокатор РАСКАН, рис. 8. За разработку этого прибора и внедрение его в производство сотрудникам лаборатории была присуждена премия Правительства РФ в области науки и техники за 1999 г.



Рис. 8. Голографический подповерхностный радиолокатор РАСКАН, разработанный в Лаборатории дистанционного зондирования

Позднее эта же технология нашла своё применение при обследовании объектов культурного наследия и археологических памятников [25] - [28]. Следует отметить, что хотя эти исследования и разработки были начаты в Лаборатории, в дальнейшем они были продолжены в тесном сотрудничестве с коллегами из США, Италии, Японии и Великобритании. Было важно, что исследования в этой области были поддержаны российскими (РФФИ и РНФ) и международными (ISTC, NATO, EU COST Action) грантами. Международное научное сотрудничество и грантовая поддержка оказали благотворное влияние на развитие направления голографических подповерхностных радиолокаторов в России. Российские ученые стали принимать активное участие в международных конференциях GPR, IWAGPR, PIERS, COMCAS и др., выступали с докладами и входили в состав оргкомитетов этих конференций.

Одним из знаковых событий, связанных с этими исследованиями, стало участие в летней юбилейной выставке Лондонского королевского общества в 2010 году. В рамках совместного международного проекта, связанного с гуманитарным разминированием, был представлен голографический подповерхностный радиолокатор РАСКАН, разработанный в Лаборатории дистанционного зондирования. В это время участие русских вызвало на Западе неподдельный интерес. Стенд Лаборатории не только был единственной российской экспозицией на выставке, но и был включен в число пяти экспозиций для демонстрации VIPам. Стенд лаборатории посетила Её Величество Королева Англии Елизавета II, чтобы ознакомиться с этой новой российской технологией, рис. 9. Не обошло вниманием нашу экспозицию и отечественное телевидение, репортаж которого можно найти по ссылке [29].

Хотя голографические подповерхностные радиолокаторы в силу своих конструктивных особенностей предназначены для исследования сравнительно небольших глубин, этого достаточно для многих технологических приложений в области неразрушающего контроля и испытания диэлектрических материалов и конструкций [30]. Их преимуществом является высокая разрешающая способность в плоскости зондирования, что особенно важно, например, при обследовании произведений искусства [27]. В настоящее время обширные исследования и разработки в области голографической подповерхностной радиолокации проводятся в Китае [31] - [33], а также и на Украине [34]. В значительной мере эти исследования опираются на российский опыт в этой области.



Рис. 9. Королева Елизавета II знакомится на стенде лаборатории с новой российской технологией в области голографической подповерхностной радиолокации

Однако ещё с 80-х годов основным направлением развития георадаров стали считать импульсные подповерхностные радиолокаторы, которые благодаря своим конструктивным особенностям способны достичь максимальной глубины проникновения в среды с высоким уровнем затухания электромагнитных волн [8], [24]. Далее будут рассмотрены основные производители серийных импульсных подповерхностных радиолокаторов в странах бывшего СССР.

Производство георадаров в России

Основным производителем импульсных подповерхностных радаров в России является группа компаний «ЛОГИС-Геотех», происхождение которой восходит к позднесоветским временам. В 1989 году ведущие конструкторы НИИ приборостроения им. В.В. Тихомирова (г. Жуковский, Московская область) в рамках конверсии ОПК

были переориентированы на разработку и производство перспективного геофизического оборудования на основе накопленного научно-технического потенциала. В 1992 году руководство НИИП и его ключевые сотрудники основали компанию «ЛОГИС» (г. Раменское, Московской области), которая начала серийное производство георадиолокационного и сейсмического оборудования для геофизических работ, продолжая при этом разработку детекторов взрывчатых веществ. Информация о деятельности «ЛОГИС» и производимой продукции приведена в [35]. Несомненно, ведущую роль в организации разработок и производстве георадаров и других приборов сыграл Н.П. Семейкин - многолетний руководитель и основатель компании «ЛОГИС».

Позднее «ЛОГИС» была преобразована в Группу компаний «ГЕОТЕХ», в состав которой вошел Научно-производственный центр георадиолокационных технологий, информационный сайт находится в [36]. «ГЕОТЕХ» занимается не только продвижением геофизического оборудования, но также разрабатывает и применяет на практике новые методы инженерных изысканий, выполняет комплексные геофизические исследования для различных отраслей народного хозяйства, включая разработку приборов специального назначения. С перечнем продукции можно ознакомиться на сайте [37].

В последние годы значение геофизических исследований в России неуклонно возрастает. На сегодняшний день приборы и услуги Группы компаний «ГЕОТЕХ» широко используются на железных и автомобильных дорогах, в нефтегазовой отрасли, строительной индустрии и во многих других отраслях отечественной и зарубежной промышленности. Одним из последних георадаров, производства «ГЕОТЕХ», является прибор ОКО-3 описанный в [38]. Это портативная, легкая и недорогая система, предназначенная для неразрушающего мониторинга окружающей среды, в первую очередь грунтов. Георадар ОКО-3 включает в себя блок управления и антенны в нескольких диапазонах частот. Все антенны взаимозаменяемы и отвечают потребностям широкого спектра применений. Конструкция данного георадара дает возможность относительно просто заменить антенный блок, благодаря чему можно увеличить глубину сканирования (до 5 метров), либо на более высоких частотах досконально исследовать поверхностные слои, рис. 10. Главная заслуга компании «ЛОГИС-ГЕОТЕХ» состоит в том, что она удовлетворила основные потребности российского рынка в георадарах, которые по своим потребительским свойствам не уступают зарубежным аналогам, но существенно дешевле. Этим объясняется высокий экспортный потенциал компании. При этом заметный вклад своими научными исследованиями и публикациями в расширение областей применения георадаров вносят и сотрудники компании «ГЕОТЕХ» [39], [40].

Еще одним известным производителем георадаров в России является Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова (ИЗМИРАН). Разработка георадаров была начата в ИЗМИРАН в начале 90-х годов и была инициирована участием в проекте «Марс-94», который предполагал полет и посадку на поверхность Марса российской межпланетной автоматической станции. К сожалению, проект не удалось завершить, т.к. станция не смогла уйти с орбиты вокруг Земли. В дальнейшем разработки и исследования были переориентированы на более «земные» проекты.



Рис. 10. Георадар ОКО-3 компании «ЛОГИС-ГЕОТЕХ»

Созданные в ИЗМИРАН георадары серии «Лоза» и «Грот» относятся к классу геофизических приборов для исследования подповерхностной структуры почвы на глубины единицы — сотни метров, в зависимости от модели прибора, используемой антенны и параметров зондируемой среды, рис. 11 и 12. Отличительные их особенности: применение наборов антенн, работающих в сравнительно низких диапазонах частот от 10 до 200 МГц, использование мощного передатчика и регистрация сигнала в его собственном спектре частот, без стробоскопического преобразования сигнала в область низких частот, что позволяет исключить большинство операций над сигналом, которые могут приводить к возникновению нежелательного побочного «звона» согласно данным приведенным в [41] - [43].



Рис. 11. Подповерхностный радиолокатор Лоза-В с центральной частотой импульса 200 МГц

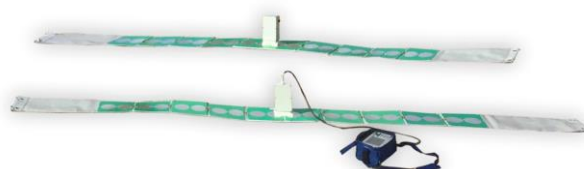


Рис. 12. Подповерхностный радиолокатор Лоза-Н с центральной частотой импульса 50 МГц

Производство георадаров в Латвии

Прямым наследником научно-исследовательской и опытно-конструкторской деятельности, проводившейся в 60-80-е годы под руководством профессора М.И. Финкельштейна, стала компания Radar Systems Inc., созданная в 1989 году его учениками и последователями. Рабочий сайт этой компании приведён на [44]. Radar Systems Inc. создавалась на базе Проблемной лаборатории авиационной

подповерхностной радиолокации Рижского авиационного университета (бывший РКИИГА) для проведения исследований и разработок в области георадарных технологий, аппаратного и программного обеспечения для решения задач мониторинга окружающей среды, инженерно-геологических изысканий, измерения толщины морского и пресноводного льда и др. Эти исследования увенчались разработкой ряда георадаров типа ZOND, LOUCH, PROFILE и PYTHON.

Последний представляет собой наземный аналог космического гайдропного радара, который предполагалось использовать для подповерхностного зондирования Марса (в печально известном проекте Марс-96, Россия) разработанный исследователями Radar Systems, Inc. в тесном сотрудничестве с коллегами из Национального космического агентства Франции (CNES) и Service d'Aeronomie (CNRS). В настоящее время Radar Systems Inc. серийно выпускает портативный универсальный георадар ЗОНД-12, показанный на рис. 13.



Рис. 13. Георадар ЗОНД-12 с антенной 300 МГц

Производство георадаров на Украине

Если в советское время на Украине исследования и разработки в области подповерхностной радиолокации практически отсутствовали, то к концу 90-х годов в Киеве возникла успешная компания Transient Technologies LLC, описание которой можно найти в [45]. В настоящее время она является ведущим разработчиком и производителем георадарного оборудования на Украине. Инженеры компании ведут исследования и разработки в области сверхширокополосных технологий с 1998 года. Современное высокотехнологичное производство Transient Technologies LLC и технический опыт ее сотрудников позволяют найти оптимальные решения для поиска подземных объектов и неразрушающего контроля материалов с учетом самых высоких требований клиентов. Более 15 стран обеспечивают дистрибуцию и полную техническую поддержку георадарной продукции Transient Technologies LLC.

Инновационные технологии, используемые при создании георадиолокационного оборудования и их надежность, позволили предприятию стать лучшим украинским производителем и узнаваемым брендом среди ведущих мировых производителей георадаров, а также создавать отличные георадиолокаторы, такие как приборы серии VIYR3, рис. 14.



Рис. 14. Георадар VIY3-500 производства Transient Technologies LLC, Киев, Украина

Заключение

В данной работе автор не ставил своей целью описать полную историю развития георадарных технологий в СССР и странах, которые образовались в результате его распада - для этого пришлось бы написать отдельную монографию. Скорее это его субъективный взгляд на события, которые повлияли на внедрение, исследования и разработки в области георадаров в наших странах.

В заключительной части работы упомянуты только те производители, которые наладили серийное производство и заняли существенную нишу не только в своих странах, но хорошо известны за рубежом. На самом деле производителей значительно больше, но были упомянуты наиболее крупные в каждой из стран.

Автор выражает свою признательность В.П. Золотареву, Radar Systems Inc., Рига, Латвия, за предоставленную информацию и советы.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-19-00043.

Литература

1. S.V. Popov, Russian RES and GPR research in Antarctica, Proceedings of the 20th International Conference on Ground Penetrating Radar, Changchun, China, June 23-27, 2024, pp. 413-416. doi: 10.1088/1742-6596/2887/1/012050

2. С.В. Попов, Шесть десятилетий радиолокационных и сейсмических исследований в Антарктиде с 2021 г. Лёд и Снег, 2021, Т. 61, № 4, стр. 587-619, doi: 10.31857/S2076673421040110
3. J.K. Ridley, W. Cudlip, S.W. Laxon, Identification of subglacial lakes using ERS-1 radar altimeter, Journal of Glaciology, 1993, 39, pp. 625–634. doi: 10.3189/S002214300001652X
4. M.I. Finkelstein, Subsurface Radar: Principal Problems of Development and Practical Use, Proc. IGARSS'91 Remote Sensing: Global Monitoring for Earth Management, Espoo, FI, June 3-6, 1991, pp. 2145-2147, doi: 10.1109/IGARSS.1991.575464.
5. V.N. Metelkin, M.I. Finkelstein, Digital Processing by Sea Ice Thickness Measuring, Proc. IGARSS'91 Remote Sensing: Global Monitoring for Earth Management, Espoo, FI, June 3-6, 1991, pp. 2481-2482, doi: 10.1109/IGARSS.1991.575548.
6. A.N. Peshkov, M.I. Finkelstein, A.I. Smutov, A.G. Vasin, K.I. Klemiato, Using of Radiolocation Measuring Devices of Freshwater Ice Thickness, Proc. IGARSS'91 Remote Sensing: Global Monitoring for Earth Management, Espoo, FI, June 3-6, 1991, pp. 1575-1575, doi: 10.1109/IGARSS.1991.579488.
7. М.И. Финкельштейн, В.А. Кутев, В.П. Золотарев, под ред. М.И. Финкельштейна, Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии, М.: Недра, 1986, С. 128, <https://www.geokniga.org/books/12419?ysclid=lo1nunk6qd831656065>
8. М.И. Финкельштейн, В.И. Карпухин, В.А. Кутев, В.Н. Метелкин, под ред. М.И. Финкельштейна, Подповерхностная радиолокация, М.: Радио и связь (1994), С. 216, ISBN 5-256-01044-1, <https://www.geokniga.org/books/18923?ysclid=lo1o8r95h0212782025>
9. М.И. Финкельштейн, Некоторые вопросы радиолокационного зондирования тонких слоистых сред, Радиотехника и электроника, 1974, Т.19, No.3. С. 528-536
10. В.И. Карпухин, А.Н. Пешков, М.И. Финкельштейн, Зондирование сельскохозяйственных посевов радиоимпульсами наносекундной длительности, Радиотехника и электроника, 1989, Т. 34, № 3, С. 550-556.
11. Tetsuo Hara, Toshihito Sakayama, The applicability of ground probing radar to site investigation, OYO Corporation, Company annual bulletin, 1983, pp. 77-91.
12. Second International Conference on the Detection of Abandoned Land Mines, MD'98, Edinburgh, UK, October 12-16, 1998, <https://digital-library.theiet.org/doi/book/10.1049/conferences-CP458>
13. United Nations Mine Action Service (UNMAS) / Who we are – Режим доступа: <https://www.unmas.org/en/who-we-are>
14. Лаборатория дистанционного зондирования / О лаборатории. – Режим доступа: <https://www.rslab.ru/russian/about/>
15. S.I. Ivashov, V.N. Sablin, I.A. Vasilyev, N.V. Nikiforov, and V.E. Minkov, Wide-Span Systems of Mine Detection, Second International Conference on the Detection of Abandoned Land Mines, MD'98. Edinburgh, UK, October 12-16, 1998, pp. 78-80, doi: 10.1049/cp:19980693.
16. S.I. Ivashov, V.N. Sablin, and I.A. Vasilyev, Wide-Span Systems of Mine Detection, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 14, no. 5, pp. 6-8, May 1999, doi: 10.1109/62.765772.
17. S.I. Ivashov, V.I. Makarenkov, V.V. Razevig, V.N. Sablin, A.P. Sheyko, and I.A. Vasiliev, Remote Control Mine Detection System with GPR and Metal Detector, Eight International Conference on Ground-Penetrating Radar, GPR'2000, University of Queensland, Gold Coast, Queensland, AU, May 23-26, 2000, pp. 36-39, doi: 10.1117/12.383598.

18. L. Capineri, S. Ivashov, T. Bechtel, A. Zhuravlev, P. Falorni, C. Windsor, G. Borgioli, I. Vasiliev, and A. Sheyko, Comparison of GPR Sensor Types for Landmine Detection and Classification, 12th International Conference on Ground Penetrating Radar, Birmingham, UK, June 16-19, 2008.
19. T. Bechtel, L. Capineri, P. Falorni, M. Inagaki, S. Ivashov, and C. Windsor, Investigation of Holographic Radar Capabilities for the Detection of Shallow Buried Plastic Antipersonnel Landmines, Progress In Electromagnetics Research Symposium, PIERS 2012, Kuala Lumpur, MY, March 27-30, 2012, doi: 10.13140/2.1.3784.5442.
20. T. Bechtel, L. Capineri, C. Windsor, M. Inagaki, and S. Ivashov, Comparison of ROC Curves for Landmine Detection by Holographic Radar with ROC Data from Other Methods, 8th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), Florence, IT, July 7-10, 2015, pp. 1-4, doi: 10.1109/IWAGPR.2015.7292645.
21. I.A. Vasiliev, S.I. Ivashov, V.I. Makarenkov, V.N. Sablin, A.P. Sheyko, RF Band High Resolution Sounding of Building Structures and Works, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 14, no. 5, pp. 25-29, May 1999, doi: 10.1109/62.765776.
22. S.I. Ivashov, V.I. Makarenkov, V.V. Razevig, V.N. Sablin, A.P. Sheyko, and I.A. Vasiliev, Concrete Floor Inspection with Help of Subsurface Radar, Eight International Conference on Ground- Penetrating Radar, GPR'2000, University of Queensland, Gold Coast, Queensland, AU, May 23-26, 2000, pp. 552-555. doi: 10.1117/12.383629.
23. Zhuravlev, V. Razevig, M. Chizh, and S. Ivashov, Non-Destructive Testing of Foam Insulation by Holographic Subsurface Radar, 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, IWAGPR 2017, Edinburgh, UK, June 28-30, 2017, doi: 10.1109/IWAGPR.2017.7996087.
24. D.J. Daniels, Surface-Penetrating Radar, London, U.K.: IEE, pp. 300, 1996, ISBN 0852968620
25. L. Bossi, P. Falorni, C. Windsor, F. Zandonai, F. Bizzarini, M. Delfino, L. Giusberti, T. Bechtel, M. Chizh, S. Ivashov, and L. Capineri, "The Imaging of Subsurface Crocodile Remains in a Limestone Slab Using Holographic Radar", 18th International Conference on Ground Penetrating Radar, Golden (CO), US, June 14–19, 2020, pp. 6-9, doi: 10.1190/gpr2020-003.1.
26. S. Ivashov, T. Bechtel, V. Razevig, L. Capineri, and M. Inagaki, A Proposed Radar Method for Non-Destructive Investigation of Egyptian Pyramids, Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, Vol. 63, No. 1, January 2021, pp. 12-19, doi: 10.1784/insi.2021.63.1.12.
27. S.I. Ivashov, V.V. Razevig, D.L. Sergeev, A.S. Bugaev, F. Zhou, E.I. Prokhanova, A.V. Shcherbakova, S.N. Dobrynin, and M. Vasilenkov, An Example of Microwave Holography Investigation of an Old Orthodox Russian Icon Dated to 19th Century, Heritage, 5, No. 3, September 2022, pp. 2804-2817, doi: 10.3390/heritage5030145.
28. L. Capineri, P. Falorni, S. Ivashov, A. Zhuravlev, I. Vasiliev, V. Razevig, T. Bechtel, and G. Stankiewicz, Combined Holographic Subsurface Radar and Infrared Thermography for Diagnosis of the Conditions of Historical Structures and Artworks, Near Surface Geophysics, Volume 8, No. 5, February 2010, pp. 355–364, doi: 10.3997/1873-0604.2010005.
29. Новости, 1 канал / Новый способ разминирования представлен российскими учеными на рестижной выставке в Лондоне / 30 июня 2010, 12:12. – Режим доступа: <http://www.1tv.ru/news/techno/156903>
30. V.V. Razevig, S.I. Ivashov, I.A. Vasiliev, A.V. Zhuravlev, T. Bechtel, and L. Capineri, Advantages and Restrictions of Holographic Subsurface Radars. Experimental Evaluation, Proceedings of the XIII International Conference on Ground Penetrating Radar, Lecce, IT, June 21-25, 2010, pp. 657-662, doi: 10.1109/ICGPR.2010.5550241.

31. Wei Liu, Zhihua He, Tao Liu, Xiaoji Song, Design of a Linear Array Holographic Subsurface Radar System, Journal of Physics: Conference Series, November 2024, 2887(1):012040, doi: 10.1088/1742-6596/2887/1/012040
32. He Zhihua, Liu Tao, Song Xiaoji, Chen Cheng, Jin Guanghu, Huang Chunlin and Su Yi, A holographic subsurface imaging radar with high plane resolution: principle and application, Journal of Physics: Conference Series, Volume 2887, 20th International Conference on Ground Penetrating Radar, 23/06/2024 - 27/06/2024, doi: 10.1088/1742-6596/2887/1/012020
33. Hui Wang, Shiyu Wu, Ling Huang, Guangyou Fang, Xin liu, Sparse Array-based Synthetic Spectrum Imaging Technique, International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), June 2018, doi: 10.1109/ICGPR.2018.8441561
34. V. Ruban, L. Capineri, T. Bechtel, G. Pochanin, P. Falorni, F. Crawford, T. Ogurtsova, L. Bossi, Automatic Detection of Subsurface Objects with the Impulse GPR of the UGO-1st Robotic Platform, IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), 21-25 September 2020, Kharkiv, Ukraine, pp. 1108-1111. doi: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252816
35. О компании ЛОГИС. – Режим доступа: <https://logsys.ru/>
36. О компании ГЕОТЕХ. – Режим доступа: <https://www.geotech.ru/about/>
37. Продукция компании «ЛОГИС». - Режим доступа: <https://logsys.ru/products/>
38. Георадар “ОКО-3”. Универсальный базовый комплект. - Режим доступа: https://www.geotech.ru/georadar_oko3/?ysclid=lsj1b1v362375076556
39. N. Pudova, A. Urusova, M. Shirobokov, and A. Marchkov, Developing GPR Surveys, Data Processing and Interpretation Techniques for Criminal Gravesites Location, 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Hong Kong, HK, June 13-16, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICGPR.2016.7572616.
40. N. Pudova, M. Shirobokov, and A. Kuvaldin, Application of the Attribute Analysis for Interpretation of GPR Survey Data, 17th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), Rapperswil, CH, June 18-21, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICGPR.2018.8441609.
41. Принципы работы георадаров серии ГРОТ 12. - Режим доступа: <https://www.georadargrot.com/principlesru>
42. P. Morozov, F. Morozov, M. Lazarev, L. Bogolyubov, A. Popov, Characterization of Antenna Radiation Pattern and Penetration Depth in Ground Penetrating Radar, Field Missions. Remote Sens. 2023, 15, 5452. <https://doi.org/10.3390/rs15235452>
43. A.I. Berkut, D.E. Edemsky, V.V. Kopeikin, P.A. Morozov, I.V. Prokopovich, A.V. Popov, Deep penetration subsurface radar: Hardware, results, interpretation, 2017, 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), June 2017, doi: 10.1109/IWAGPR.2017.7996052
44. НПФ Радарные Системы / Radar Systems, Inc. / О фирме – Режим доступа: https://www.radsys.lv/ru/about-company_ru/
45. About Transient Technologies LLC. – Режим доступа: <https://geo-matching.com/companies/transient-technologies-llc>
46. Лещанский Ю.И., Лебедева Г.Н., Исследование поглощения дециметровых и сантиметровых радиоволн в грунте, Известия вузов. Радиофизика. 1968. Т. 11. № 2. С. 205.
47. Leschanskiy I., Lebedeva G.N., Schumilin V.D., Electrical Parameters of Sandy and Loamy Soils in The Range Of Centimeter, Decimeter And Meter Wavelength, Radiophysics and Quantum Electronics. 1971. Т. 14. № 4. С. 445.