

## **ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ГРУНТА НА ДАЛЬНОСТЬ ЗОНДИРОВАНИЯ В ГЕОЛОКАЦИИ**

### ***Иван Валерьевич Прокофьев***

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, аспирант, тел. (913)908-78-45, e-mail: infiwow777@yandex.ru

### ***Максим Алексеевич Марков***

ООО НЭМЗ «ТАЙРА», 630056, Россия, г. Новосибирск, ул. Софийская, 2А, инженер по метрологии; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, аспирант, тел. (999)467-72-20, e-mail: cj.mj12@yandex.ru

### ***Антон Игоревич Пуртов***

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электронных приборов», 630005, Россия, г. Новосибирск, Писарева, 53, инженер 2 категории; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, аспирант, тел. (913)469-46-28, e-mail: a.p.93@mail.ru

### ***Любовь Васильевна Шебалкова***

Акционерное общество «Научно-исследовательский институт электронных приборов», 630005, г. Новосибирск, ул. Писарева, 53, ведущий инженер-руководитель группы; Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, ст. преподаватель кафедры АИУС, тел. (+7383)216-05-48, e-mail: lvsheb@list.ru

### ***Валерий Павлович Ющенко***

Новосибирский государственный технический университет, 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, доктор технических наук, профессор кафедры АИУС, тел. (+7383)346-26-23, e-mail: yushhenko@corp.nstu.ru

Георадиолокация (подповерхностное радиолокационное зондирование; англ. ground-penetrating radar, GPR)— геофизический метод, основанный на излучении импульсов электромагнитных волн и регистрации сигналов, отраженных от различных объектов зондируемой среды. Прибор, в котором реализованы принципы георадиолокации, называется георадаром. Объектами приложения георадиолокации являются среды с низким и умеренным поглощением электромагнитных волн: гранит, кварцит, известняк, гипс, песчаные грунты, суглинки с низкой влажностью, водные объекты, ледники, инженерные сооружения. Основные его элементы — импульсный генератор с передающей антенной, приемная антенна и блок управления. Рассмотрены диэлектрические свойства грунта. В статье приведены описание, недостатки и преимущества существующих конструкций и принципов георадаров для геодезического мониторинга и обнаружения скрытых объектов, а также показано исследование принципов построения радаров подземного зондирования. Обсуждаются результаты проведенных экспериментов с применением сверхширокополосных антенн в геолокации. Сделан вывод об использовании георадаров разного вида в геопространственной разведке.

**Ключевые слова:** георадиолокация, радары подповерхностного зондирования, сверхширокополосные сигналы, диэлектрическая проницаемость, частота, антенна, решетка, грунт.

## INFLUENCE OF SOIL PROPERTIES ON THE RANGE OF SOUNDING IN GEOLOCATION

### *Ivan V. Prokofiev*

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Ph. D. Student, phone: (913)908-78-45, e-mail: infiwow777@yandex.ru

### *Maxim A. Markov*

ООО NEMZ «ТАЙРА», 2А, Sophiyskaya St., Novosibirsk, 630056, Russia, Engineer in Metrology; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Ph. D. Student, phone: (999)467-72-20, e-mail: cj.mj12@yandex.ru

### *Anton I. Purtov*

Joint-Stock Company «Scientific Research Institute on Electronic Devices», 53, Pisareva St., Novosibirsk, 630005, Russia, engineer; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Ph. D. Student, phone: (913)469-46-28, e-mail: a.p.93@mail.ru

### *Lyubov V. Shebalkova*

Joint-Stock Company «Scientific Research Institute on Electronic Devices», 53, Pisareva St., Novosibirsk, 630005, Russia, Leading Engineer-Team Manager; Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, Senior Lecturer of AICS Department, phone: (+7383)216-05-48, e-mail: lvsheb@list.ru

### *Valery P. Yushhenko*

Novosibirsk State Technical University, 20, Prospect K. Marx St., Novosibirsk, 630073, Russia, D. Sc., Professor of AICS Department, phone: (+7383)346-26-23, e-mail: yushhenko@corp.nstu.ru

Georadiolocation (subsurface radar sounding) is a geophysical method based on the emission of pulses from electromagnetic waves and the recording of signals reflected from various objects of the sounded medium. The differential properties of the soil are considered. A conclusion is drawn on the use of georadars of various types in geospatial intelligence.

**Key words:** georadiolocation, radars of subsurface sounding, ultra-wide band signals, permittivity, frequency, antenna, grating, ground.

Радары подповерхностного зондирования (РПЗ) предназначены для мониторинга скрытых объектов, они позволяют осуществлять диагностику подземных коммуникаций, грунтов под строительные площадки, дорожных покрытий и взлетно-посадочных полос аэродромов, локальных неоднородностей в грунте, мин, мест утечек топлива из подземных хранилищ, уровня грунтовых вод, а также проведение геофизических, археологических и других исследований. Существенной спецификой РПЗ является использование сверхширокополосных (СШП) сигналов (видеоимпульсных, с дискретной перестройкой частоты), распространяющихся в средах с ярко выраженным затуханием и дисперсией. Показатель широкополосности  $\mu$ , равный отношению разности и суммы максимальной и минимальной частот в спектре сигнала для СШП - сигналов составляет  $0.25 \leq \mu \leq 1$ .

Однако далеко не все сигналы, отвечающие этому условию, обладают свойствами сверхширокополосных (форма сигнала искажается при излучении, приеме и рассеянии от объектов; зависит от направления излучения и т.д.). В тоже время эти свойства проявляются всегда, когда длительность сигнала в пространстве - произведение длительности сигнала  $\tau$  и скорости электромагнитной волны в среде  $v$  становится намного меньше, чем размер излучающей (приемной) апертуры или размер объекта  $D$ , отражающего сигнал. Поэтому неравенство  $D \gg vt$  должно дополнять отмеченное выше неравенство для СШП - сигналов и систем.

Несмотря на существенные достижения в исследовании и разработке РПЗ, проводимые отечественными и зарубежными фирмами, проблема далека от завершения. В частности, не удается обнаруживать и идентифицировать противопехотные и противотанковые мины с вероятностью 99,6% и малой вероятностью ложных тревог, затруднено выполнение требования к 3-5% (от глубины зондирования) погрешности определения толщины (тем более электрофизических параметров) слоев дорожных покрытий и т. п.

Отметим основные тенденции развития радаров подповерхностного зондирования это качественное повышение информативности и достоверности интерпретации радиоизображений подповерхностных сред и объектов, сокращение времени мониторинга, исследование и внедрение новых технологий, касающихся как алгоритмов реконструкции и совершенствования программного комплекса, так и модулей РПЗ.

Важное место при разработке РПЗ занимают конструкторско-технологические вопросы, определяющие дизайн устройства, функционирование датчиков местоположения и съема решеток выборок, удобство и безопасность эксплуатации.

Обнаружение скрытных боеприпасов, самодельных взрывных устройств (СВУ), а также наземных мин оказалось успешным при использовании сверхширокополосных радаров. Мина может иметь ряд рассеивающих центров, каждый со своей собственной диаграммой обратного рассеяния, а в случае пластиковых наземных мин внутренняя структура может создавать дополнительные рассеиватели. Типичные портативные радиолокационные системы используют отдельные переносные приемно-передающие антенны, которые расположены непосредственно над поверхностью земли, однако существуют и варианты размещения антенн в одном корпусе.

В настоящее время существуют портативные варианты систем для операций по гуманитарному разминированию, например, GPRMINEHOUND, Германия, состоящий из радиочастотного и цифрового блока, как показано на рис. 1.

Радар подповерхностного зондирования (GPR) – это универсальный термин, охватывающий множество приложений. GPR-антенны обычно предназначены для работы в максимально широкой полосе частот и часто предназначены для излучения импульсных сигналов. В этом отношении они имеют много общего с другими системами СШП.

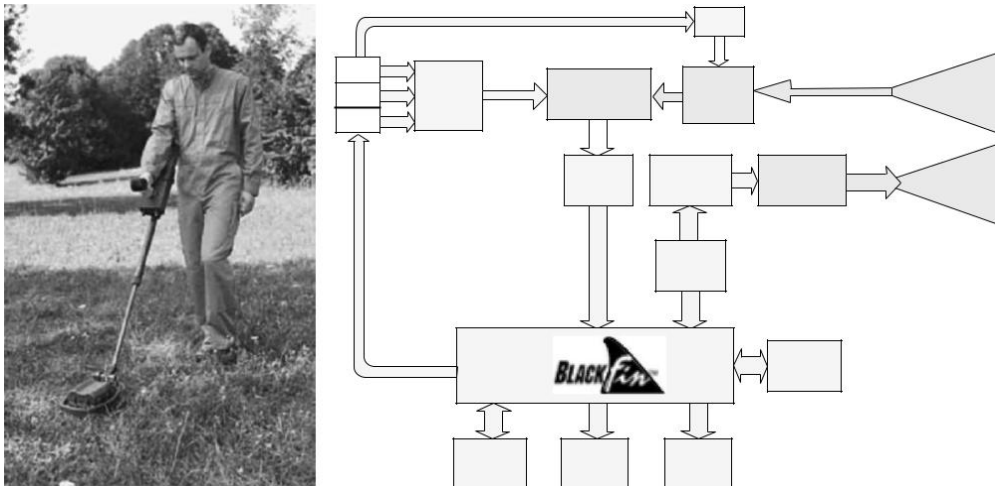


Рис. 1. Детектор MINEHOUND и модульная система радиолокационного схема (с разрешения RERA Technology)

Перечислим основные отличительные особенности георадиолокации в сравнении с радиолокацией воздушных целей [1].

- Среда действует на сигнал как фильтр нижних частот. Поэтому для обеспечения требуемой дальности зондирования необходимо понижать среднюю частоту спектра сигнала. Это ведёт к снижению разрешающей способности.
- Невозможность использования высоких частот – причина отказа от радиоимпульсов и переход к сверхширокополосным видеоимпульсам. В видеоимпульсах число полупериодов сокращается до 2–3, что увеличивает разрешающую способность и делает её приемлемой для практических целей.
- Антенны неизбежно в большинстве случаев малонаправленные, а угловая разрешающая способность радара повышается путём применения синтезированной апертуры.
- Антенны должны обеспечивать эффективную передачу энергии в грунт и как можно меньше в воздух. Обычно антенны располагают вплотную к поверхности или на очень малом расстоянии от поверхности. Так как антенны малонаправленные, возникает задача дополнительной экранировки антенн, чтобы избежать паразитного излучения назад, в сторону воздуха и в стороны, вдоль поверхности грунта.
- Если среда имеет значительные потери, метод синтезированной апертуры оказывается малоэффективным. При большом затухании среди всех возможных положений антенной системы сигнал будет наибольшим лишь в небольшом числе точек, ближайших к объекту зондирования.
- Диэлектрическая проницаемость слоёв грунта, как правило, заранее неизвестна. Возможны кратные отражения между границами слоёв, между слоем и поверхностью грунта. В слоях с низкими потерями, расположенными между слоями с высокой проводимостью или влажностью, возможны волноводные типы распространения.

- Повышение рабочей частоты радара даже в средах с низкими потерями иногда невозможно по причине неровностей поверхности и неоднородностей диэлектрической проницаемости среды.

Наиболее часто используемым является импульсный метод зондирования, кроме импульсных радаров существуют радары, основанные на линейно-частотной модуляции (ЛЧМ), и радары с пошаговой перестройкой частоты и измерением амплитуды и фазы на каждой частоте. Получаемый в конечном итоге результат можно преобразовать к тому же импульсу, который получается при зондировании видеоимпульсными радарными. Всё различие между указанными методами зондирования и видеоимпульсным методом сводится к аппаратной реализации процесса измерений.

Опыт работы с георадарами показывает, что оптимальным диапазоном частот для зондирования верхних нескольких метров во влажном песчаном или сухом глинистом грунте является диапазон (50 – 150) МГц (длины волн в воздухе (6 – 2) м).

Конструкции применяемых в георадарах антенн очень разнообразны из-за различий в целях и задачах зондирования, требуемой дальности зондирования и различий в свойствах исследуемых сред. Применяемые в георадарах антенны относятся к типу сверхширокополосных. В таких антеннах отношение верхней  $f_2$  и нижней  $f_1$ , рабочих частот составляет более чем  $\frac{f_2}{f_1} = \frac{3}{1}$ .

Мощность принятого сигнала  $P_r$  при радиолокации локальных объектов в однородной среде даётся формулой:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{4\pi} * \frac{1}{4\pi R^2} * \frac{S_{\text{эфф}}}{4R^2} * \left[ -4 \operatorname{Im}(\sqrt{\varepsilon}) R * \frac{2\pi}{\lambda} \right], \quad (1)$$

где  $P_r$ , – мощность излучаемого сигнала;  $G_t$ ,  $G_r$  – коэффициенты усиления передающей и приёмной антенн;  $R$  – расстояние зондирования;  $S_{\text{эфф}}$  – эффективная площадь рассеяния (ЭПР) объекта;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды распространения.

От формулы, описывающей мощность принятого излучения при радиолокации в воздухе [2], выражение (1) отличается экспоненциальным множителем, описывающим затухание в среде. Под длиной волны в формуле (1) следует понимать длину волны, соответствующую средней частоте спектра видеоимпульса георадара. Первый множитель  $R^2$  описывает сферическую расходимость волны, излучаемой передающей антенной, второй множитель  $R^2$  описывает расходимость волны, отражённой от объекта.

Мощность минимального обнаруживаемого сигнала  $P_{\min}$  (Вт) на фоне тепловых шумов и шумов приёмника определяется формулой

$$P_{\min} = \frac{kB(T_0 F_n + T) E_{s/n}}{N}, \quad (2)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура зондируемой среды (или антенны при низком КПД антенны);  $B$  – ширина рабочей полосы частот радара, принимаемых и поступающих на вход приёмника, Гц;  $F_n$  – шум-фактор приёмника;

$$T_0 = 290^\circ\text{K}, kT_0 = 4 \cdot 10^{-21} \text{Вт/Гц}.$$

Согласно проведённой оценке теоретически достижимый предел энергетического потенциала георадара составляет около 190 – 200 дБ для средней частоты радара 100 – 10 МГц соответственно. При этой оценке предполагается число накоплений сигнала  $5 \cdot 10^4$ , амплитуда напряжения генератора  $U_r = 300$  В, уровень собственных шумов приёмника (кроме тепловых) предполагается малым по сравнению с тепловыми шумами. При использовании генераторов с амплитудой импульса  $U_r = 3000$  В энергетический потенциал может составлять 210 – 220 дБ.

Приведём результаты расчётов, которые могут использоваться при оценке амплитуд сигналов, отражённых от линейных объектов (трубы, кабели) и локальных объектов. Расчёты проводились методом конечных разностей во временной области. В табл. 1 даны максимальные амплитуды отражённых сигналов от линейных и локальных объектов  $U_{\text{лин}}$  и  $U_{\text{лок}}$ , делённые на амплитуду сигнала, отражённого от металлической плоскости  $U_{\text{пл}}$ . Были рассмотрены металлические трубы и пустые трубы с диэлектрическими стенками, металлические и диэлектрические сферы (валуны). Все объекты располагались на одном и том же расстоянии  $R_0 = 0,85$  м. Приведены пределы изменения указанных величин при изменении диаметра объекта от 15 до 45 – 55 см. Расчёты проводились для грунтов с различными значениями диэлектрической проницаемости и проводимости. Длительность импульса генератора составляла 1,5 нс.

Примем порог обнаружения сигнала при указанном расстоянии  $R_0$  для линейного объекта:  $\frac{U_{\text{лин}}}{U_{\text{пл}}} = 0,2$  и для локального объекта:  $\frac{U_{\text{лок}}}{U_{\text{пл}}} = 0,05$ .

Таблица 1

Амплитуды отраженных сигналов

Объект	Параметры грунта		
	$\varepsilon'=10, \sigma=0,01$ см/м	$\varepsilon'=10, \sigma=0,08$ см/м	$\varepsilon'=20, \sigma=0,08$ см/м
Металлическая труба    полю Е	0,32-0,48	0,4-0,56	0,41-0,57
Металлическая труба ⊥ полю Е	0,29-0,47	0,18-0,41	0,2-0,42
Диэлектрическая труба    полю Е	0,13-0,34	0,1-0,38	0,12-0,36
Диэлектрическая труба ⊥ полю Е	0,29-0,67	0,23-0,8	0,3-0,71
Металлическая сфера	0,11-0,225	0,06-0,2	0,1-0,18
Диэлектрическая сфера	0,025-0,075	0,03-0,17	0,05-0,175

Эти требования к минимальным обнаруживаемым уровням сигнала позволяют обнаружить объекты, поперечный размер которых составляет не менее 0,3–0,6 длины волны в грунте. При размерах антенн около 40–50 см и длительности импульса генератора 1,5 – 3 нс для локальных и линейных объектов минимальный диаметр составляет 30 см, для труб при их благоприятной ориентации к вектору  $E$  (металлическая труба параллельна  $E$ , пустая диэлектрическая перпендикулярна  $E$ ) – около 15 см.

Из всех веществ, имеющих в грунте, вода имеет наибольшую диэлектрическую проницаемость (81–83 в диапазоне низких частот). Поэтому содержание воды в среде определяет её действительную часть диэлектрической проницаемости. Комплексная диэлектрическая проницаемость воды в районе частоты дипольной релаксации молекул воды даётся формулой Дебая [3]:

$$\varepsilon_B = \varepsilon_B^0 + \frac{(\varepsilon_B^0 - \varepsilon_B^{\infty})}{\left(1 - i \frac{f}{f_p}\right)}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_B^{\infty}, \varepsilon_B^0$  – диэлектрическая проницаемость воды в пределе высоких и низких частот;  $f$  – частота;  $f_p$  – частота релаксации.

Графики действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости воды в зависимости от частоты показаны на рис. 2.

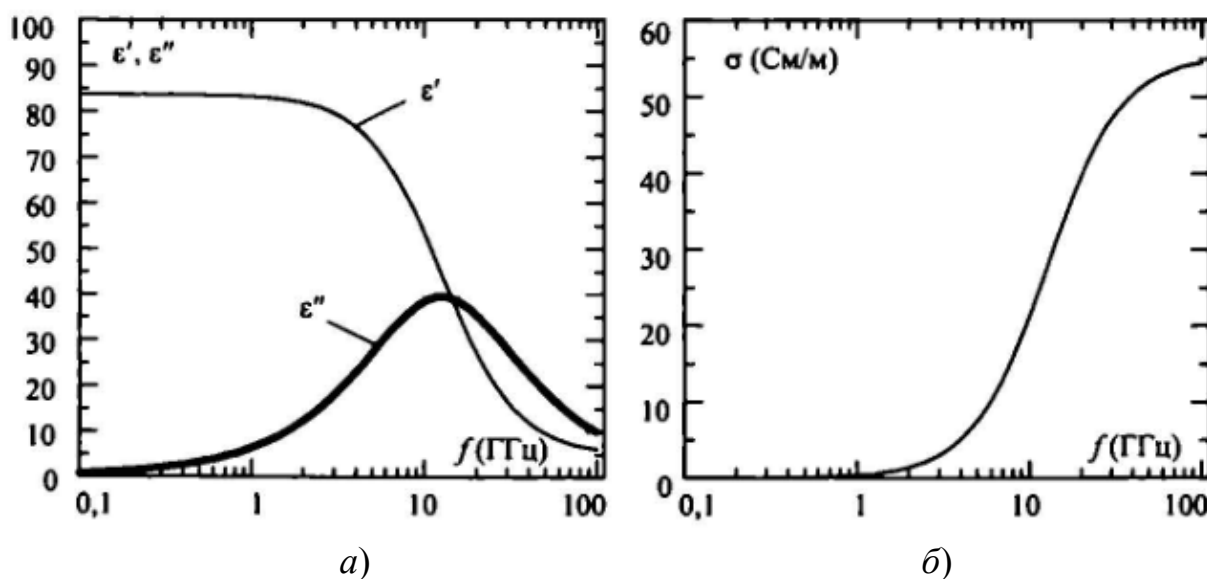


Рис. 2. Действительная, мнимая часть диэлектрической проницаемости (а) и проводимость ( $\sigma = \varepsilon'' \varepsilon_0 \omega$ ) (б) воды при температуре  $t = 10^\circ\text{C}$

Частота релаксации увеличивается с ростом температуры, а статическая диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon_B^0$  уменьшается. Для воды с растворёнными солями к выражению (3) добавляется слагаемое, обусловленное ионной прово-

димостью  $\sigma$  (См/м), а значения  $\varepsilon_B^0$ ,  $f_p$  несколько изменяются из-за присутствия солей:

$$\varepsilon_{раств} = \varepsilon_B + i * \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega}, \quad (4)$$

где:  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота, Гц;  $\varepsilon_0 = 8,8542 * 10^{-12}$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м.

Электрическое поле радиоволны частично ориентирует диполи молекул воды в направлении вдоль поля. При прекращении действия поля в результате теплового движения и вращения молекул дипольный момент объёма воды экспоненциально стремится к нулю с постоянной времени  $\tau_p$ , связанной с частотой

релаксации: 
$$\frac{f_p}{\tau_p} = \frac{1}{f_p}.$$

Рабочий диапазон длин волн, принимаемых съёмочной аппаратурой, составляет от долей микрометра до метров. Среда действует на сигнал как фильтр нижних частот. Поэтому для обеспечения большей дальности зондирования необходимо понижать среднюю частоту спектра сигнала. Понижение средней частоты ведёт к снижению разрешающей способности. Требование высокой разрешающей способности находится в противоречии с требованием обеспечения большой дальности зондирования [4]. Рассмотренные грунты представляют собой весьма неблагоприятные с точки зрения условий зондирования. Максимальная дальность зондирования принята равной 4 м.

Число накоплений сигнала принято равным  $N = 104$ . Средняя частота спектра сигнала георадара берётся максимально возможной при заданной дальности зондирования. Это делается для достижения наибольшей разрешающей способности георадара. Результаты расчётов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Максимальная частота зондирования (средняя частота диапазона радара)  $f$  (МГц) при максимальной дальности зондирования 4 м

№	Характеристика грунта	Тип объекта		
		плоскостной	локальный	линейный
Температура грунтов 2-4С°				
1	Юрская глина коричневого цвета	-	-	-
2	Суглинок серого цвета	150(0.2)	100(0.3)	150(0.2)
3	Глина из ледниковых отложений	50(0.6)	40(0.7)	53(0.6)
4	Суглинок желтого цвета	83(0.4)	64(0.44)	90(0.35)
Температура грунтов 20-24С°				
5	Юрская глина коричневого цвета	57(0.67)	44(0.8)	58(0.67)
6	Суглинок серого цвета	23(0.9)	18(1.2)	25(0.9)
7	Глина из ледниковых отложений	22(1)	17(1.2)	23(1)
8	Суглинок желтого цвета	27(0.8)	20(1)	28(0.8)



Найденные оптимальные частоты зондирования объектов различных типов (плоскостные, локальные и линейные) близки между собой. Оптимальная частота наименьшая при зондировании локальных объектов, так как в этом случае ослабление сигнала максимально. Понижение средней частоты зондирования ведёт к увеличению минимального по размерам обнаруживаемого объекта. При понижении зондирующей частоты до 20 МГц размер минимального обнаруживаемого локального объекта увеличится до  $\approx 75$  см.

В слабопоглощающих песчаных и сухих суглинистых грунтах затухание радиоволн гораздо меньше, и оптимальные частоты зондирования лежат в диапазоне (100–200) МГц.

В результате выполненных теоретических исследований в работе получены следующие основные результаты:

Исследованы применения принципов подповерхностной радиолокации в системах обнаружения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Daniels D. J. Surface-Penetrating Radar. – London, UK: IEE, 1996. – 300 p.
2. Справочник по радиолокации / Ред. М. Сколник; пер. с англ. Под ред. К. Н. Трофимова. – Т. 1. – М.: Сов. радио, 1976. – 456 с.
3. Дебай П., Закк Г. Теория электрических свойств молекул / Под ред. Л. Э. Гуревича. – М.–Л.: Объединённое научно-техническое издательство, 1936. – 144 с.
4. Druchinin S. V., Izyumov S. V. Measured and calculated dielectric permittivity of moist clayey soils // 6-th Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. – Proceedings, Bochum, Germany, 3–7 Sept. 2000. - P. P-GR09

© *И. В. Прокофьев, М. А. Марков, А. И. Пуртов,  
Л. В. Шебалкова, В. П. Ющенко, 2019*