

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-57-90



### Ссылки для цитирования:

Рязанцев П.А. Картирование границ почвенных горизонтов методом георадиолокации // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. Вып. 105. С. 57-90. DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-57-90

### Cite this article as:

Ryazantsev P.A., Mapping the boundaries of soil horizons using ground-penetrating radar, Dokuchaev Soil Bulletin, 2020, V. 105, pp. 57-90, DOI: 10.19047/0136-1694-2020-105-57-90

### Благодарность:

Финансирование работ осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Отдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН).

### Acknowledgments:

The studies were carried out within the framework of State assignment of KarRC RAS (Department of Multidisciplinary Scientific Research KarRC RAS).

## <sup>1</sup>Картирование границ почвенных горизонтов методом георадиолокации

© 2020 г. П. А. Рязанцев

*Отдел комплексных научных исследований КарНЦ РАН, Россия,  
185910, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11,  
<https://orcid.org/0000-0002-1944-9479>, e-mail: [chthonian@yandex.ru](mailto:chthonian@yandex.ru).  
Поступила в редакцию 18.05.2020, после доработки 12.11.2020,  
принята к публикации 17.12.2020*

**Резюме:** В статье рассмотрена роль георадиолокации в решении задач почвоведения, а также на примере полевых данных оценена точность прослеживания почвенных горизонтов. Исследование текущего состояния вопроса показало, что существует значительная вариативность электрофизических свойств разных типов почв. При этом

---

<sup>1</sup> Статья рекомендована к публикации по итогам Четвертой открытой конференции молодых ученых Почвенного института им. В.В. Докучаева “Почвоведение: Горизонты будущего”, 11–14 февраля 2020 г.

диэлектрическая проницаемость почвенных горизонтов может как увеличиваться, так и уменьшаться с глубиной. Этим фактом обусловлена необходимость параметризации почвенного профиля при георадарных исследованиях для предотвращения ошибок. На основе обобщающего анализа практических примеров установлено, что погрешность определения отдельных почвенных горизонтов георадаром составляет в среднем 2–10 см в зависимости от частоты используемой антенны и особенностей строения почвенного профиля. Для обоснования сделанных выводов проведены опытно-методические работы по прослеживанию почвенных горизонтов методом георадиолокации на примере типовых подбуров, расположенных на Заонежском полуострове (Республика Карелия), строение и состав которых были детально описаны предшествующими исследователями. Съёмка выполнена георадаром ОКО-2 (Логис-Геотех, Россия) с антенным блоком с центральной частотой 400 МГц. Работы на участке велись по отдельным трансектам, с привязкой к опорному почвенному разрезу. Детальный анализ радарограмм в первую очередь обеспечил прослеживание подошвы горизонта ВС. Полученные результаты показали, что мощность почвы в пределах профиля варьирует от 23 до 32 см, а средняя ошибка наблюдений составила  $\pm 3$  см. Кроме того, выявлено влияние на запись обломков шунгитовых сланцев и дифференциация влажности в толще почвенных горизонтов. Присутствие шунгитовых сланцев приводит к формированию дифрагированных волн и увеличению амплитуд отраженного сигнала, тогда как увеличение влажности характеризуется уменьшением скоростей электромагнитной волны.

**Ключевые слова:** диэлектрическая проницаемость, электропроводность, радарограмма, подбур, влажность, шунгитовые сланцы.

## <sup>2</sup>Mapping the boundaries of soil horizons using ground-penetrating radar

P. A. Ryazantsev

*Department of Multidisciplinary Scientific Research KarRC RAS, Russia,  
186910, Petrozavodsk, Pushkinskaya str., 11*

*<https://orcid.org/0000-0002-1944-9479>, e-mail: [chthonian@yandex.ru](mailto:chthonian@yandex.ru).*

---

<sup>2</sup> The article was recommended for publication at the Fourth Open Conference of Young Scientists of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute. “Soil Science: Horizons of the Future”, February 11–14, 2020.

*Received 18.05.2020, Revised 12.11.2020, Accepted 17.12.2020*

**Abstract:** The article considers the role of GPR in solving problems of soil science, as well as the accuracy of tracking soil horizons using the example of field data. The study of the current state of the issue has shown that there is significant variability in the electrophysical properties of different types of soil. In this case, the dielectric constant of the soil horizons can both increase and decrease with depth. This fact determines the need for parameterization of the soil profile in GPR studies to prevent errors. Based on a generalizing analysis of practical examples, it has been established that the error in determining individual soil horizons by a GPR is on average 2–10 cm, depending on the frequency of the GPR antenna and the structural features of the soil. Experimental and methodological work to substantiate the main conclusions was carried out to trace the soil horizons by the GPR method using the example of typical entic podzol located on the Zaonezhsky Peninsula (Republic of Karelia), the structure and composition of which were described in detail earlier. The survey was carried out by a georadar OKO-2 (Logis-Geotech, Russia) with an antenna unit with a central frequency of 400 MHz. Fieldwork on the study site was carried out along separate transects, according to the reference soil profile. A detailed analysis of the radargrams provided, first of all, tracking the base of the BC horizon. The results obtained showed that the thickness of the soil within the profile varies from 23 to 32 cm, and the average observation error was  $\pm 3$  cm. Besides, the influence on the recording of shungite shale fragments and the differentiation of moisture content in the soil horizons was revealed. The presence of shungite shale leads to the formation of diffracted waves and an increase in the amplitudes of the reflected signal, while an increase in humidity is characterized by a decrease in the velocities of the electromagnetic wave.

**Keywords:** dielectric constant, electrical conductivity, radargram, entic podzol, humidity, shungite shale.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время методы геофизики уверенно входят в повседневную практику почвоведения и агротехники, обеспечивая решение широкого спектра практических задач от контроля влажности до картирования почв ([Allred et al., 2008](#)). При этом объем выполняемых работ в этом направлении значительно меньше в сравнении с поисково-разведочными и инженерными исследованиями. Ограничивающим фактором для геофизических методов

при изучении почвенного профиля выступает ряд сложностей, к наиболее значимым из которых относится необходимость выполнять исследования от дневной поверхности на среднюю глубину 2 м, зачастую с сантиметровой точностью. Пространственная неоднородность почвенного покрова и временная изменчивость отдельных его свойств, например влажности, также оказывает значительное влияние на геофизические поля ([Allred et al., 2010](#)). Из всего разнообразия геофизических методов широко используются электрические и электромагнитные, такие как: методы сопротивления ([Поздняков, 2001](#); [Samouëlian et al., 2005](#)), электромагнитной индукции ([James et al., 2003](#); [Doolittle, Brevik, 2014](#)) и георадиолокация ([Liu et al., 2016](#); [Zajícová, Chuman, 2019](#)).

Георадиолокация может служить эффективным способом оценки стратиграфии и внутренних неоднородностей почв ([Doolittle, Collins, 1995](#); [Doolittle, Butnor, 2009](#)). Система генетических горизонтов почв является благоприятным объектом, так как представляет собой набор субгоризонтальных слоев с контрастными свойствами, изменение которых находит отражение в электрофизических характеристиках. В свою очередь, метод георадиолокации предрасположен к изучению горизонтально-слоистых сред, обеспечивая сбор данных с высоким разрешением в горизонтальной и вертикальной проекциях. В подходящих условиях его применение позволяет определять глубину залегания основных почвенных горизонтов (А, В, С), а также других контрастных слоев: плотных и сцементированных, мерзлых, иллювиальных, насыщенных органическим веществом, – тогда как тонкие изменения почвенных свойств и переходные горизонты отражаются в волновом поле слабее ([Doolittle, Butnor, 2009](#)).

В таблице 1 приводятся наиболее актуальные задачи, которые могут быть решены с привлечением георадиолокации. Можно наблюдать, что активно развивается направление по изучению влажности почв. Это связано с существованием прямых эмпирических зависимостей между электрофизическими показателями почвы и степенью ее увлажнения, наиболее известное из которых уравнение Топпа ([Topp et al., 1980](#)). Также существует значительное количество исследований стратиграфии почвенного профиля.

**Таблица 1.** Актуальные задачи для метода георадиолокации в почвоведении

**Table 1.** Recent tasks of GPR in soil science

<b>Решаемая задача</b>	<b>Литературный источник</b>
Оценка уровня влажности и ее мониторинг	<a href="#">Huisman et al., 2003</a> ; <a href="#">Lunt et al., 2005</a> ; <a href="#">Weihermüller et al., 2007</a> ; <a href="#">Grote et al., 2010</a> ; <a href="#">Minet et al., 2012</a> ; <a href="#">Steelman et al., 2012</a> ; <a href="#">Ardekani, 2013</a> ; <a href="#">Zhang et al., 2014</a>
Изучение строения почвенного профиля и мощности отдельных почвенных горизонтов	<a href="#">Doolittle, Collins, 1995</a> ; <a href="#">Simeoni et al., 2009</a> ; <a href="#">Winkelbauer et al., 2011</a> ; <a href="#">André et al., 2016</a> ; <a href="#">Pogosyan et al., 2018</a> ; <a href="#">Ikazaki et al., 2018</a>
Картирование областей засоления	<a href="#">Shih et al., 1994</a> ; <a href="#">al Hagrey, Müller, 2000</a> ; <a href="#">Tsoflias, Becker, 2008</a>
Поиск областей антропогенного загрязнения	<a href="#">Daniels et al., 1995</a> ; <a href="#">Cassidy, 2007</a> ; <a href="#">Rejšek et al., 2015</a>
Исследование строения и биомассы корневых систем	<a href="#">Hruška et al., 1999</a> ; <a href="#">Butnor et al., 2001</a> ; <a href="#">Stover et al., 2007</a> ; <a href="#">Guo et al., 2013</a> ; <a href="#">Borden et al., 2017</a>
Определение степени промерзания почв	<a href="#">Steelman et al., 2010</a> ; <a href="#">Butnor et al., 2014</a> ; <a href="#">Leger et al., 2017</a>

Наряду с имеющимися позитивными предпосылками, георадиолокация не является универсальным методом. Остро стоит вопрос о ее применимости для разных почвенных условий. Один из существующих подходов предлагает использовать специальный индекс пригодности георадиолокации (*GPR suitability index*) с целью районирования территорий со значениями от 1 (высокий потенциал) до 6 (неподходящий) ([Doolittle et al., 2007](#)). Для расчета такого индекса привлекается целый ряд параметров: процентное содержание глины, электропроводность, коэффициент поглоще-

ния натрия, наличие карбоната и сульфата кальция и т. д. В результате строятся тематические карты, которые отражают пригодность данного метода с разной детальностью и масштабом ([Doolittle et al., 2010](#)).

Применение георадиолокации особенно эффективно при необходимости обследования больших площадей, так как метод позволяет получить большое количество данных за относительно короткое время. Экономическая оценка, выполненная на примере обследования дренажной системы на 300 га водно-болотных угодий, показала: если выполняется бурение скважин каждые 300 м, георадиолокация обеспечивает 7%-ный рост производительности и 20%-ную экономию средств со средней ошибкой в 16%, тогда как при необходимом шаге скважин в 60 м показатели возрастают до 353% и 406% соответственно ([Szuch et al., 2006](#)).

Цель настоящего исследования заключалась в выполнении комплексного анализа возможностей георадиолокации для решения задач почвоведения, а также в исследовании точности определения морфологии почвенных горизонтов на примере полевых данных.

## ПРИНЦИПЫ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

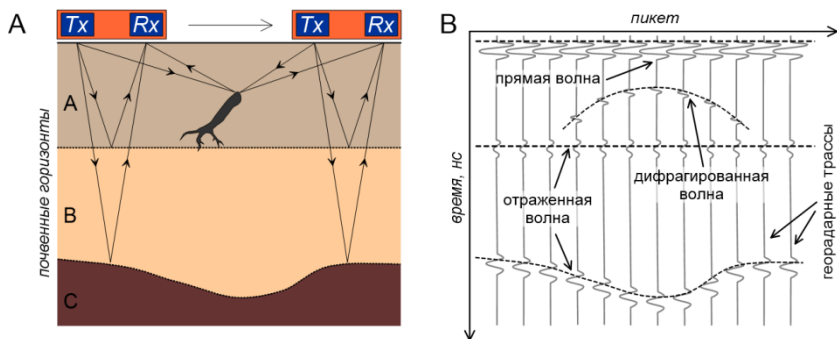
Метод георадиолокации основывается на излучении наносекундных электромагнитных импульсов фиксированной частоты в зондируемую среду с последующей регистрацией и анализом сигнала, отраженного от внутренних границ и локальных неоднородностей ([Владов, Судакова, 2017](#)). К основным характеристикам, определяющим распространение электромагнитной волны в почвах, следует отнести диэлектрическую проницаемость и электрическую проводимость. Данные величины связаны с рядом физических свойств почв: гранулометрическим составом, влажностью, плотностью, содержанием гумуса. Важным параметром в методе георадиолокации является центральная частота зондирующего сигнала, так как она определяет глубину исследования метода и разрешающую способность. Оптимальный диапазон частот для изучения большинства почвенных профилей 250–800 МГц.

Для выполнения полевых наблюдений используется георадар – прибор, состоящий из передающей ( $Tx$ ) и принимающей ( $Rx$ )

антенны с фиксированной центральной частотой сигнала, блока регистрации и обработки. Наземные георадарные измерения проводятся вдоль единичных профильных линий или по системе профилей. Регистрируемый сигнал представляется в виде георадарной трассы – функции изменения амплитуды электромагнитного импульса во времени, то есть несет в себе информацию об отражении сигнала от внутренних неоднородностей при прохождении зондируемой среды. Совокупность трасс, полученных при перемещении георадара, формирует радарограмму, которая представляет собой двухмерное отображение распространения волнового электромагнитного поля в некоторой области. По горизонтальной оси радарограммы отсчитывается перемещение по профилю и учет положения каждой трассы, а по вертикальной – время, начиная от генерации до прихода отражений сигнала. Цветовой градиент характеризует интенсивность (амплитуду) отражений импульса от неоднородностей среды.

Основной способ интерпретации радарограмм заключается в поиске схожих форм импульсов на соседних трассах, составляющих ось синфазности, по которой определяется положение отражающей границы (рефлектора). Наличие рефлектора свидетельствует об изменении электрофизических свойств, и в большинстве случаев это соотносится с реально существующими почвенными границами. Кроме отраженной волны известны и другие типы, например дифрагированная волна, которая формируется на локальных объектах: валунах, корнях и т. д. (рис. 1).

Сочетание на записи волн всех видов формирует волновое поле георадиолокации, именно его необходимо проинтерпретировать для выявления реальных внутренних границ зондируемой среды. Для этого кроме выделения осей синфазности выполняется определение георадарных фаций – областей с определенной волновой картиной. Фации могут иметь разную форму (параллельные, волнистые, хаотические), а также разные протяженность, интенсивность отражений и частотный состав, что является отражением структуры, формы залегания и состава зондируемых почв и грунтов ([Старовойтов, 2008](#)).



**Рис. 1.** Процесс выполнения георадарной съемки (А) и регистрируемая радарограмма (В).

**Fig. 1.** The process of GPR survey (A) and resulting radar data record (B).

Глубину залегания отражающих границ ( $Z$ ) можно рассчитать следующим образом:

$$Z = \frac{V \times t}{2},$$

где  $V$  – скорость электромагнитной волны,  $t$  – время прихода импульса.

Скорость можно определить исходя из величины относительной диэлектрической проницаемости среды:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}},$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость,  $c$  – скорость света в вакууме.

Следует отметить, что относительная диэлектрическая проницаемость является величиной комплексной и включает в себя две части – действительную и мнимую, – первая из которых определяет непосредственное распространение электромагнитной волны в среде, а вторая – электрические потери (затухание волны). Данные величины зависят от частоты, однако для георадарного диапазона частот 20 МГц – 2 ГГц влияние мнимой частоты минимально. Если это условие нарушается, георадиолокация становится слабоприменимой (Annan, 2003). Относительная диэлектрическая проницаемость измеряется в условных единицах.



Для большинства грунтов известны условно-нормальные значения относительной диэлектрической проницаемости, которые для почв составляют 5–20 условных единиц. Наличие такого диапазона связано с изменчивостью содержания компонентов почв (твердая матрица, вода с растворенными солями, воздух), а также с их распределением в пространстве и с внутренними связями ([Владов, Судакова, 2017](#)).

Для образования отраженной волны необходим контраст электрофизических свойств почвенных горизонтов, а параметром, определяющим его интенсивность, служит коэффициент отражения ( $K_{omp}$ ), который рассчитывается как:

$$K_{omp} = \frac{\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}}{\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2}},$$

где  $\varepsilon_1$  – относительная диэлектрическая проницаемость вышележащего горизонта,  $\varepsilon_2$  – относительная диэлектрическая проницаемость нижележащего горизонта.

Чем ближе  $K_{omp}$  к  $\pm 1$  (в зависимости от параметров среды он может быть как положительным, так и отрицательным), тем интенсивность отражения выше и, как следствие, граница контрастнее. На практике рефлекторы могут возникать даже при значениях  $K_{omp}$  близких к нулю, что обусловлено влиянием разности электрической проводимости ([Владов, Судакова, 2017](#)).

Условием для выделения отдельных почвенных горизонтов является отношение их мощности к преобладающей длине излучаемой электромагнитной волны в среде. Вертикальная ( $\Delta r$ ) и горизонтальная ( $\Delta l$ ) разрешающая способность определяются соотношениями:

$$\Delta r \geq \frac{V}{4 \cdot f_c} = \frac{\lambda}{4} \quad \text{и} \quad \Delta l \geq \sqrt{2\lambda h},$$

где  $f_c$  – центральная частота зондирующего сигнала в среде,  $\lambda$  – длина волны в среде. При невыполнении этого условия два маломощных слоя на записи сольются в один, так как сигналы, отраженные от них, интерферируют.

Еще один параметр необходимо учитывать при проектиро-

вании работ – коэффициент затухания, который определяется следующим равенством:

$$\alpha = \frac{\sigma}{2} \cdot \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}},$$

где  $\sigma$  – электрическая проводимость (электропроводность) среды,  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость,  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость. Таким образом, в случае изучения почв, обладающих высокой электропроводностью за счет большого содержания глины, засоления, минерализации поровой влаги и т. п., метод георадиолокации может оказаться малоэффективным.

Для относительно низких георадарных частот разрешающая способность составляет десятки сантиметров, тогда как для самых высоких – первые сантиметры. Некоторые средние показатели, которые применимы для большинства производимых георадарных антенных блоков, приводятся в таблице 2. Точность измерений также зависит от шага измерения по профилю и частоты дискретизации сигнала.

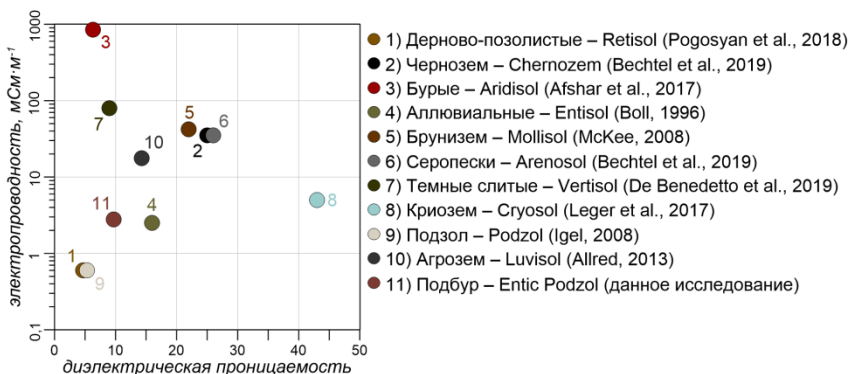
**Таблица 2.** Параметры съемки для антенных блоков с различной частотой зондирования

**Table 2.** The parameters of antenna units for different sounding frequency

Параметр	Центральная частота, МГц		
	150–250	400–700	1000–1500
Глубина зондирования, м	12–8	5–3	1.5–1.0
Разрешающая способность по глубине, см	35–25	15–10	5–3
Пространственная разрешающая способность на глубине 1 м и скорости 5 см/нс, см	26–20	16–12	10–8
Рекомендуемый шаг между трассами, мм	100–50	50–30	30–10
Нормальная временная развертка записи, нс	400–200	100–48	32–16

## ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВ

Как уже упоминалось, разнообразие почвенных свойств и их пространственная неоднородность приводит к изменчивости относительной диэлектрической проницаемости и электрической проводимости. На рисунке 2 представлена обобщающая диаграмма, демонстрирующая вариативность электрофизических свойств разных типов почв при выполнении полевых измерений методом георадиолокации. Можно наблюдать, что изменения происходят в широком диапазоне, без выраженной системы.



**Рис. 2.** Электрофизические свойства некоторых типов почв.

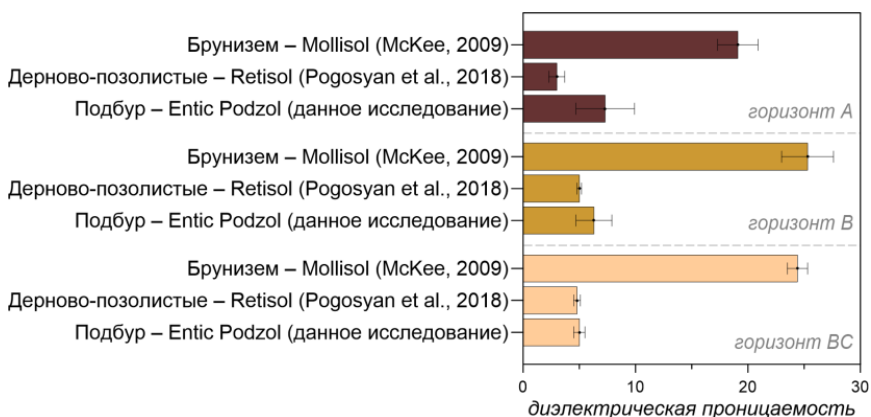
**Fig. 2.** Electrical properties of certain types of soils.

Кроме того, экспериментально доказано, что даже почвы одного типа при нахождении в разных природных обстановках, допустим при разной минерализации воды, будут отличаться в геофизических полях. Этим фактом обусловлена необходимость параметризации почвенного профиля при георадарных исследованиях для предотвращения возможных ошибок.

Следует отметить, что детальное лабораторное изучение электрофизических свойств почв с разными параметрами (содержание глины и гумуса, степень увлажнения и т. д.) и при разных измерительных условиях является отдельным научным направлением, по которому существует целый ряд экспериментальных работ ([Чудинова, 2009](#); [Бобров и др., 2019](#)). Особую роль в таких

исследованиях занимает метод рефлектометрии во временной области (*time domain reflectometry, TDR*), основанный на физических принципах во многом схожих с георадиолокацией. Данный метод при помощи специального зонда позволяет определять относительную диэлектрическую проницаемость в конкретной области почвенного разреза, он активно применяется для контроля и мониторинга влажности почв ([Robinson et al., 2003](#)).

Далее рассмотрим, как может происходить изменение электрофизических свойств в зависимости от почвенного горизонта. На рисунке 3 представлены значения относительной диэлектрической проницаемости для горизонтов А, В, ВС трех разных типов почв, которые были получены методом рефлектометрии во временной области.



**Рис. 3.** Наблюдаемая вариативность относительной диэлектрической проницаемости в почвенном профиле.

**Fig. 3.** Variability of dielectric constant in the soil profile.

Как показал сводный анализ данных, относительная диэлектрическая проницаемость может как увеличиваться, так и уменьшаться с глубиной. В рассматриваемых случаях для каждого отдельного горизонта отклонение наблюдаемых значений от осредненного значения всего профиля составляет 10–20%. Это значит, что в ряде случаев при обработке радарограмм можно использовать общую скорость электромагнитной волны для расчета глубин

залегания рефлекторов, без присвоения отдельных значений каждому генетическому горизонту.

В свою очередь, рассчитанный коэффициент отражения для границ раздела горизонтов А–В и В–ВС в каждом случае достаточно мал, в среднем  $K_{отр} = \pm 0.05$ . Тем не менее, на радарограммах наблюдаются отчетливые рефлекторы. Отсюда можно сделать вывод о том, что, несмотря на схожесть горизонтов, составляющих почвенный разрез, по величинам относительной диэлектрической проницаемости (например, в случае равномерного увлажнения) иные свойства почв горизонтов (электропроводность, плотность) обеспечивают контрастные отражения сигнала.

Важным параметром применимости георадиолокации для изучения почв является разрешающая способность метода, то есть с какой точностью может быть определена глубина или мощность отдельных горизонтов. Как уже отмечалось выше, точность наблюдений зависит от центральной частоты излучаемого электромагнитного сигнала, а также свойства среды, через которую он распространяется.

Ниже представлены результаты георадарного поиска различных почвенных границ (табл. 3), включающие данные о: глубине залегания горизонта ( $h$ ); центральной частоте сигнала ( $f_c$ ); опробованиях буром; расчете погрешности измерений ( $\Delta$ ).

Анализ показывает, что использование даже относительно низкочастотных антенн позволяет получить результаты с сантиметровой точностью на глубинах до 1 м и более. В зависимости от частоты зондирования и типа почвенного профиля погрешность составляет  $\pm 2$ –10 см (определяется как разность глубинных отметок по данным георадара и прямых наблюдений), это обеспечивает прослеживание основных почвенных горизонтов.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Опытно-методические работы по картированию почвенных горизонтов методом георадиолокации выполнялись на площади Заонежского полуострова (Республика Карелия). Данная территория значительно отличается от других районов Карелии и сопредельных территорий по природным условиям почвообразования: разнообразием форм рельефа, присутствием шунгитсодержащих

почвообразующих пород, климатическим условиям и большим количеством листовых пород в составе древостоев ([Морозова и др., 2004](#)).

**Таблица 3.** Точность георадара при определении глубины залегания почвенных горизонтов

**Table 3.** GPR accuracy in determining the depth of soil horizons

Тип почвы	Отражающий горизонт	h, см	$f_c$ , МГц	Пробы, ед.	$\Delta$ , см
Подзолы (Podzol), Флорида, США <a href="#">Collins, Doolittle, 1987</a>	Кровля глинисто-иллювиального горизонта Bt	100–178	120	4	$\pm 6$
Буроземы (Luvisol), Западная Австралия <a href="#">Simeoni et al., 2009</a>	Граница между горизонтами A и B	20–120	250	37	$\pm 10$
Бурые (Aridisol), Юго-восточный Иран <a href="#">Afshar et al., 2017</a>	Кровля сцементированного горизонта Buzm	35–45	250	3	$\pm 6$
Криоземы (Cryosol) Аляска, США <a href="#">Léger et al., 2017</a>	Кровля вечной мерзлоты	34–95	400	7	$\pm 7$
Подбуры (Cambisol), Альпы, Германия <a href="#">Winkelbauer et al., 2011</a>	Подошва гумусового горизонта Ah	4–30	800	132	$\pm 2$
Красно-желтые ферраллитные (Plinthosol), Восточная Африка <a href="#">Ikazaki et al., 2018</a>	Кровля плинтитового горизонта Bmv (PP)	27–130	300, 800	4	$\pm 3$

В таких своеобразных природных условиях сформировался почвенный покров, характеризующийся чрезвычайной пестротой и сложностью, который представляет особый интерес для изучения, в том числе и с привлечением методов геофизики ([Рязанцев, Бахмет, 2020](#)).

Шунгитовые породы как почвообразующий субстрат сильно

отличаются от других материнских пород высоким содержанием углерода, гигроскопической влаги, поглотительной способностью. Содержание углерода в таких породах изменяется от 5 до 95%, и чем больше углерода, тем интенсивнее она разрушается и выветривается, обогащая почвы элементами минерального питания ([Бахмет, 2012](#)). Гранулометрический состав шунгитсодержащих почвообразующих пород разнообразен: хрящеватые пески, супеси, суглинки, реже глины. Четвертичные отложения района работ сложены главным образом ледниковой мореной, которая формирует обширные равнины, покрывающие до 80% всей площади полуострова. Морена представлена валунной супесью с мощностью варьирующей от 0.2 до 5 м ([Морозова и др., 2004](#)).

На площадях, занятых элюво-делювием шунгитовых пород и шунгитовой мореной, наиболее распространены буроземы и подбуры. Подбуры Заонежского полуострова отличаются от широко распространенных в Карелии подзолов более темной окраской, пониженной кислотностью, железистостью, а также более высоким содержанием элементов минерального питания. Их разделение на генетические горизонты осложнено каменистостью и щебнистостью.

Объектом исследования был участок подбуров с известным и хорошо изученным строением почвенного профиля, сформированных на шунгитовых сланцах, в центральной части Заонежского полуострова (62.48166 с. ш., 34.79749 в. д.) ([Разнообразие почв, 2006](#)). Для описания границ почвенных горизонтов был намечен трансект, проходящий от увлажненных оторфованных почв в низине, через вырубку к малоизмененным подбурам на возвышенностях. При выполнении работ учитывались рельеф и существующие биоценозы. Отдельно выполнена координатная привязка к опорному разрезу.

Почвенный профиль подбуров на участке по данным О.Н. Бахмет и Ю.В. Преснухина имеет следующее строение: А0 (0–6 см) – лесная подстилка; А1В (6–17 см) – темно-бурый, сильно каменистый, песчаный горизонт, присутствует органика; ВС (17–24 см) – бурый горизонт, сложен обломками шунгитовых сланцев, мелкозем песчаного состава ([Разнообразие почв, 2006](#)). Изучаемые почвы суглинистые со значительным процентом крупнозема (см.

табл. 4), имеют бурый достаточно слабо дифференцированный профиль, также отмечается повышенное содержание углерода и азота ([Разнообразие почв, 2006](#)).

**Таблица 4.** Гранулометрический состав, содержание углерода и азота для исследуемой почвы ([Разнообразие почв, 2006](#))

**Table 4.** Particle size distribution, carbon and nitrogen content for the test soil (according to [Raznoobrazie pochv, 2006](#))

Горизонт	Гранулометрический состав, %							C, %	N, %
	> 10	10-7	7-5	5-3	3-2	2-1	< 1		
A0	-	-	-	-	-	-	-	32.7	1.29
A1B	0.9	1.3	1.3	2.0	3.1	13.3	78.1	4.0	0.27
BC	1.8	1.6	1.6	2.4	2.9	12.0	77.7	3.9	0.27

## МЕТОДЫ ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

В задачи полевых исследований на рассматриваемом участке входило прослеживание изменения мощности почвы по данным георадиолокации, определение причин и условий формирования георадарных рефлекторов, а также выявление факторов, обуславливающих изменчивость почвенного покрова. Работы проводились с использованием георадара ОКО-2 (Логис-Геотех, Россия), оснащенного антенным блоком с центральной частотой 400 МГц. Наблюдения выполнены вдоль наземного профиля общей длиной 480 м, положение которого на местности определялось GPS навигатором. Учет перемещения осуществлен при помощи штатного датчика ДП-32. Шаг сканирования по профилю составил 5 см, что позволило получить радарограмму, которая включает 9 600 отдельных зондирующих трасс.

Для почв на участке относительная диэлектрическая проницаемость определена с опорой на имеющийся опорный разрез и данные, полученные по гиперболам дифрагированной волны, и составляет в среднем 12 ед. При используемой временной раз-



вертке 50 нс получен полезный сигнал с глубины более 1.5 м. Это позволило определить положение отражающих границ и сопоставить их с имеющимся почвенным разрезом. В текущих условиях вертикальная разрешающая способность составила 5 см, а горизонтальная – 2 см на поверхности и до 20 см на глубине в 1 м.

Регистрация и обработка данных выполнялись в программном комплексе *GeoScan32* (Логис-Геотех, Россия). Перед выполнением непосредственной интерпретации выполнялась фильтрация. Частотный анализ записи показал, что произошло смещение центральной частоты до 250 МГц, а также возник дополнительный экстремум на 20 МГц. Это свидетельствует о влиянии проводимости почв на регистрируемые данные. Низкочастотная составляющая устранена при помощи полосовой фильтрации. Также выполнена корректировка положения нуля записи и вычитание среднего для удаления сигнала прямого прохождения. С целью повышения контраста отдельных слоев на записи подбирался профиль усиления.

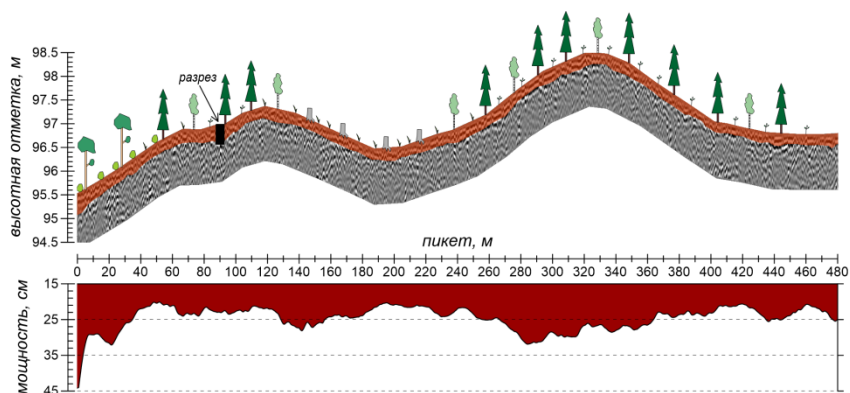
Кроме регистрации основного георадарного профиля, выполнялись отдельные наблюдения антенным блоком 1 700 МГц вдоль почвенных разрезов в сочетании с измерением электрофизических свойств почвенных горизонтов методом временной рефлектометрии, аппаратурой TDR200 (Campbell Scientific, USA). Для этого после подготовки разреза по его стенке с шагом 4 см втыкался зонд, которым измерялась относительная диэлектрическая проницаемость почвы. Полученные замеры представлены в виде графика, по которому можно точно оценить вариативность электрофизических свойств почвенного разреза. Далее в этом же месте на поверхности выполнен небольшой георадарный профиль. Сбор данных происходил с шагом 3 см и временной разверткой 16 нс. Такая конфигурация обеспечила глубину исследования до 60 см и разрешение порядка 1.5 см. Набор процедур обработки радарограмм соответствовал указанному выше.

В результате подобные комплексные наблюдения обеспечивают параметризацию разреза и облегчают финальную интерпретацию. Следует отметить, что большая часть Республики Карелия (в том числе Заонежский полуостров) – благоприятный регион для использования георадаров при изучении почв и четвертичных от-

ложений из-за исключительно низкой минерализации грунтовых вод, а также преобладания отложений песчаного состава.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим данные георадиолокации на примере профиля, проходящего с востока на запад, вдоль пологого склона от заболоченной приозерной области в сторону лесного массива. После выполнения первичной обработки на записи определялись признаки границы между горизонтом ВС и материнской породой – наличие протяженной оси синфазности, высокие амплитуды отражений, смена картины волнового поля (рис. 4).



**Рис. 4.** Георадарный профиль на исследуемом участке (вверху) и установленная изменчивость мощности почвенного профиля (внизу).

**Fig. 4.** GPR transect in the studied area (above) and identified variability of soil profile thickness (below).

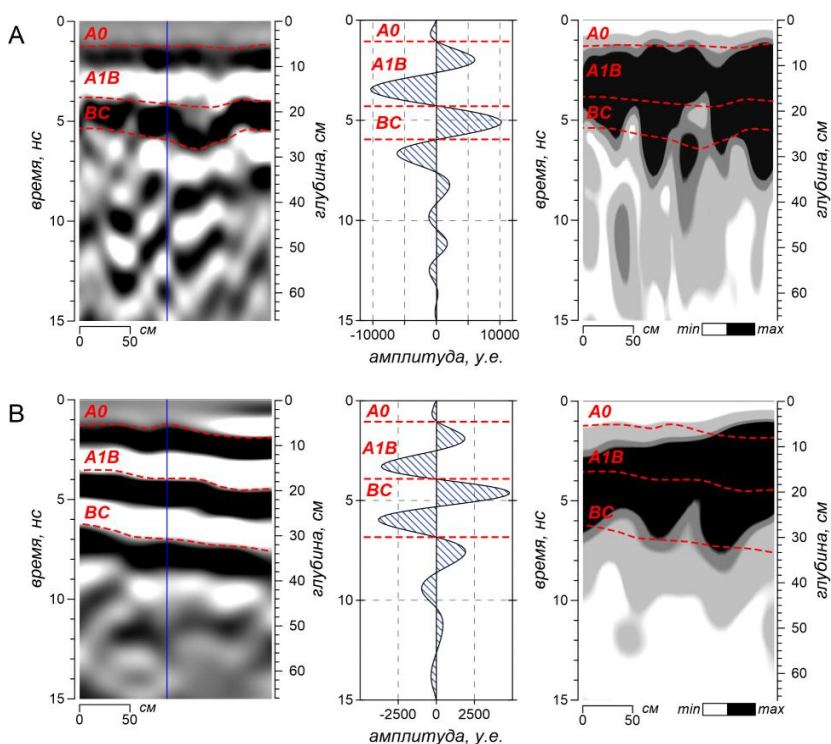
В результате была прослежена кровля подстилающей шунгитовой морены и определено, что вдоль профиля почвенный покров имеет дифференцированную мощность. В начальной части на пикетах (ПК) 0–30 отмечается наличие оторфованных почв. Это выражено в развитии характерного покрова сфагновых мхов и в увеличении толщины почв до  $32 \pm 5.0$  см. Далее, между ПК 50–150 наблюдается равномерное положение нижней границы ВС,

мощность почвенного покрова вдоль профиля составляет  $24 \pm 1.9$  см. Фрагмент профиля на ПК 150–250 расположен в пределах участка свежей вырубki, что может быть причиной частичной эрозии почвенного покрова до  $23 \pm 1.6$  см. Следующая область ПК 265–365 соотносится с неизменным лесным массивом и, как следствие, с ненарушенными подбурами с мощностью  $29 \pm 2.0$  см. После чего снова фиксируются условно-нормальные почвы (как на ПК 50–150) мощностью  $24 \pm 1.3$  см.

С опорой на почвенный разрез проводился детальный анализ радарограмм, так как это позволяет выявить георадарные признаки для границ раздела горизонтов А0 и А1В, а также оценить точность измерений. Для реализации такого подхода выделен фрагмент записи в области расположения разреза (рис. 5А) и фрагмент, где мощность почв максимальна (рис. 5В). Время каждой записи составляет 15 нс, а горизонтальная протяженность – 2 м. В качестве первого этапа интерпретации радарограмм необходимо определить, как на записи выглядит отражение от искомым границ. Существует несколько подходов для определения положения рефлектора: по первым вступлениям; пику максимальной амплитуды; фазовому переходу.

В рассматриваемом случае граница между горизонтами определяется по смене фазы импульса с “–” на “+”, так как первый такой переход полностью соответствует глубине раздела между горизонтами А0 и А1В, по данным почвенного разреза; также на этом уровне наблюдается протяженная ось синфазности (рис. 5А). Выявленная граница имеет время записи  $t = 1.3$  нс при значении относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon = 12$ , скорость волны составляет  $V = 8.6$  см/нс, расчет глубины залегания  $Z$  дает результат в 5.5 см, что на 0.5 см отличается от прямых наблюдений в разрезе. На границе А1В–ВС время записи  $t = 4.2$  нс при  $\epsilon = 12$  и  $V = 8.6$  см/нс, глубина  $Z = 18.1$  см, что на 1.0 см отличается от прямых наблюдений. Несколько иная ситуация отмечается для подошвы горизонта ВС, в общем виде расчет границы верен:  $t = 6.0$  нс,  $V = 8.6$  см/нс,  $Z = 25.8$  см, при наблюдаемых 24 см в разрезе. Наряду с этим для данной области отмечается нарушение фазы импульса и резкое возрастание амплитуды. Объяснением такого явления может служить повышенное содержание в гори-

зонте ВС крупных обломков подстилающих шунгитовых сланцев, о чем свидетельствует волнистый характер рефлектора и гиперболы дифрагированной волны. Ниже на записи наблюдается смена характера волновой картины – от параллельной фации, что является нормальным для почвы, к хаотической, соотносимой с подстилающей моренной. Анализ мгновенных амплитуд отражений (энергogramмы) показал, что почвенный профиль имеет более высокую энергию отраженного сигнала в сравнении с нижележащими коренными породами.



**Рис. 5.** Фрагмент радарграммы, отдельная трасса и энергogramма для участков почв с разной мощностью на пикете 90 (А) и пикете 290 (В) по профилю наблюдений.

**Fig. 5.** Fragment of radargram, a separate trace and Hilbert transformation for sections with different thickness at picket 90 (A) and picket 290 (B) along GPR profile.

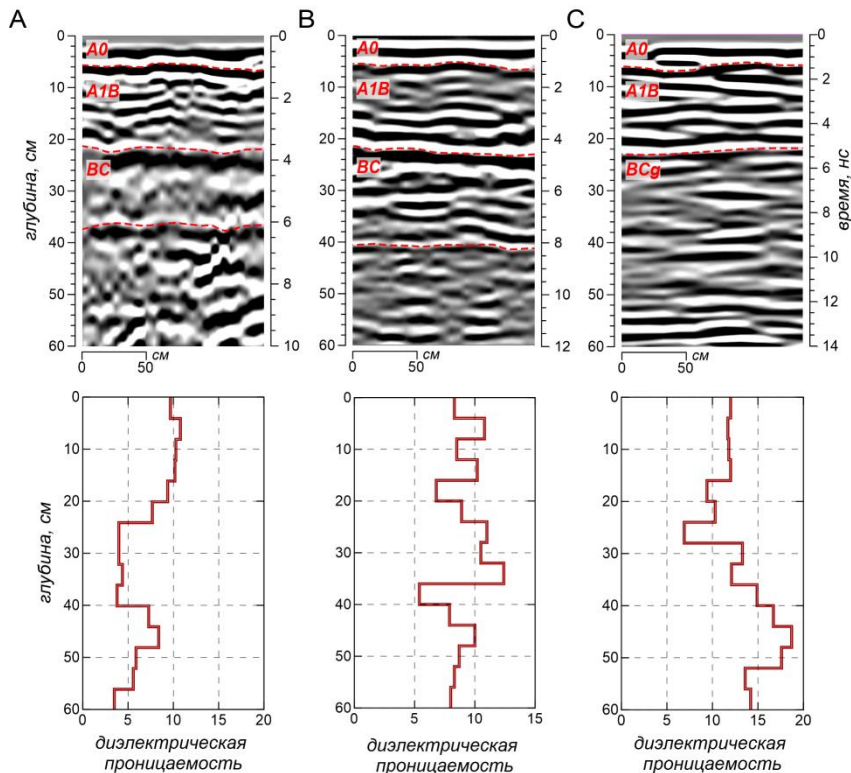
Далее обратимся к фрагменту радарограммы по области, где выявлена максимальная мощность почв (рис. 5В). На записи сразу хорошо различаются интенсивные параллельные оси синфазности, характерные для зондирования горизонтальных сред. При этом отмечается сохранение условия смены фазы на границах горизонтов. Сами границы ровные вследствие отсутствия крупнообломочной фракции. Анализ отдельных почвенных горизонтов показал следующие результаты: раздел А0–А1В имеет среднее  $t = 1.6$  нс,  $V = 8.6$  см/нс, в итоге  $Z = 6.9$  см; А1В–ВС  $t = 4.0$  нс,  $V = 8.6$  см/нс, а  $Z = 17.2$  см; кровля материнских пород фиксируется при  $t = 7.1$  нс,  $V = 8.6$  см/нс, а  $Z = 30.5$  см.

Анализ энергограммы также демонстрирует приуроченность интенсивных отражений к почвенной толще. Конфигурация почвенного профиля соответствует имеющемуся разрезу, а рост мощности обусловлен увеличением горизонта ВС на 5 см в сравнении с типовым разрезом. В общем виде по результатам детального анализа радарограммы и отдельных фрагментов установлено, что георадар обеспечил определение мощности профиля А0–А1В–ВС исследуемого подбуря со средней погрешностью  $\pm 3$  см.

Влияние влажности на регистрируемую волновую картину демонстрируется на примере перехода от автоморфных почв к полугидроморфным, расположенным в районе исследований. Для большей детальности измерения выполнены антенной 1 700 МГц, также привлечены данные промера относительной диэлектрической проницаемости методом рефлектометрии. На рисунке 6 представлены три фрагмента радарограммы длиной 1.5 м, отражающие переход от подбуров, расположенных на возвышенности (рис. 6А), к подбурам на склоне (рис. 6В) и далее к подбурам глеевым в низине (рис. 6С). Соответственно наблюдается переход горизонта ВС к ВСg. Следы оглеения проявляются в виде сизых и ржавых пятен, прожилок и примазок. Расстояние между записями составляло 30 м, а превышение высот – порядка 5 м.

Первым признаком изменения влажности служит разность времен регистрации известных горизонтов, что связано с изменением скорости электромагнитной волны. Данный факт подтверждается детальными промерами относительной диэлектрической проницаемости. В случае малого увлажнения для горизонта А0 и

А1В  $\varepsilon_{\text{ср}} = 9.7$  ( $V = 9.6$  см/нс), а для ВС  $\varepsilon_{\text{ср}} = 4.4$  ( $V = 14$  см/нс). Переходная зона характеризуется А0 и А1В  $\varepsilon_{\text{ср}} = 8.9$  ( $V = 10.0$  см/нс), а для ВС  $\varepsilon_{\text{ср}} = 9.3$  ( $V = 9.3$  см/нс). При избыточном увлажнении для горизонта А0 и А1В  $\varepsilon_{\text{ср}} = 11.2$  ( $V = 9.0$  см/нс), тогда как для горизонта ВС картина резко меняется, происходит градиентный рост  $\varepsilon$  до 19 условных единиц ( $V = 6.8$  см/нс).



**Рис. 6.** Фрагменты радарограмм и графики вариации относительной диэлектрической проницаемости для участков автоморфных (А), переходных (В) и полугидроморфных (С) почв.

**Fig. 6.** Fragments of a GPR profiles and graphs of variations in dielectric constant for sections of automorphic (A), transition (B) and semihydromorphic (C) soils.

Таким образом, можно фиксировать постепенное падение скорости волны от профиля к профилю, что свидетельствует о постепенном увеличении влажности к подножью возвышенности. Можно проследить, как подошва горизонта ВС, четко регистрируемая на первой записи, ослабевает на второй и становится слабо читаемой на последней радарограмме при переходе к ВСg. Кроме того, если для подбуров подстилающая шунгитовая морена имеет хаотическую волновую картину, то для глеевых подбуров подошва горизонта ВСg не определяется, а нижележащие не идентифицированные слои имеют параллельные оси синфазности.

Практические примеры показывают возможность определения границ почвенных горизонтов и их прослеживание на значительные расстояния. Получаемая точность наблюдений позволяет оценить пространственную структуру почвенного профиля и выявить участки аномальных изменений. Важным фактором для успешного применения метода георадиолокации является привлечение прямых почвенных наблюдений, что позволяет разработать опорную интерпретационную схему. Так как изучение почв для методов геофизики является крайне сложной задачей с неоднозначным решением, отсутствие подобных данных ограничивает спектр исследований и переводит получаемые результаты в статус оценочных и, зачастую, умозрительных.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ продемонстрировал, что метод георадиолокации может успешно применяться для решения целого спектра задач почвоведения. Высокая производительность и точность наблюдений позволяет исследовать маломощные почвенные горизонты с разрешением до 2–3 см, оценивать изменения их электрофизических параметров в горизонтальной проекции и на глубину, а также выполнять поиск и учет локальных неоднородностей. На примере подбуров Заонежского полуострова показана возможность для прослеживания мощности почвенных горизонтов с привлечением опорных почвенных разрезов георадаром с антенной частотой 400 МГц. Непрерывная георадиолокационная съемка обеспечила обследование значительной площади, позволила получить схему мощности почвенного покрова и выявить области из-

менения толщины. Получаемые модельные разрезы и карты можно сопоставлять с данными о ландшафтах и биоценозах для выявления наиболее значимых факторов почвообразования. Дальнейшее развитие метода георадиолокации и его адаптация к специфике задач почвоведения зависит от способов комплексного использования данных и интегрирования геофизических и почвенных методов исследований.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бахмет О.Н.* Остров Кижы. Литогенные почвы, сформировавшиеся на шунгитовых сланцах. Путеводитель почвенной экскурсии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. 44 с.
2. *Бобров П.П., Беляева Т.А., Крошка Е.С., Родионова О.В.* Определение влажности образцов почв диэлектрическим методом // Почвоведение. 2019. № 7. С. 859–871. DOI: [10.1134/S0032180X19050034](https://doi.org/10.1134/S0032180X19050034).
3. *Владов М.Л., Судакова М.С.* Георадиолокация: от физических основ до перспективных направлений. Учебное пособие. М.: ГЕОС, 2017. 240 с.
4. *Морозова Р.М., Федорец Н.Г., Бахмет О.Н.* Почвы и почвенный покров Заонежья Карелии // Труды КарНЦ РАН. 2004. Вып. 6. С. 69–89.
5. *Поздняков А.И.* Полевая электрофизика почв. М.: МАИК “Наука/Интерпериодика”, 2001. 187 с.
6. Разнообразие почв и биоразнообразие в лесных экосистемах средней тайги / Отв. редактор *Н.Г. Федорец*. М.: Наука, 2006. 287 с.
7. *Рязанцев П.А., Бахмет О.Н.* Использование электроразведочных методов для картирования почвенных неоднородностей // Почвоведение. 2020. № 5. С. 535–546. DOI: [10.31857/S0032180X20050123](https://doi.org/10.31857/S0032180X20050123).
8. *Старовойтов А.В.* Интерпретация георадиолокационных данных. М.: Изд-во МГУ, 2008. 191 с.
9. *Чудинова С.М.* Диэлектрические показатели почвы и категории почвенной влаги // Почвоведение. 2009. № 4. С. 441–451.
10. *Afshar F.A., Ayoubi S., Castrignanò A., Quarto R., Ardekani M.R.M.* Using ground-penetrating radar to explore the cemented soil horizon in an arid region in Iran // Near Surface Geophysics. 2017. Vol. 15. No. 1. P. 103–110. DOI: [10.3997/1873-0604.2016049](https://doi.org/10.3997/1873-0604.2016049).
11. *al Hagrey S.A., Müller C.* GPR study of pore water content and salinity in sand // Geophysical Prospecting. 2000. Vol. 48. No. 1. P. 63–85. DOI: [10.1046/j.1365-2478.2000.00180.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2000.00180.x).



12. *Allred B.J., Daniels J.J., Ehsani M.R.* (Eds.) Handbook of Agricultural Geophysics. Boca Raton: CRC Press, 2008. 432 p. DOI: [10.1201/9781420019353](https://doi.org/10.1201/9781420019353).
13. *Allred B.J., Freeland R.S., Farahani H.J., Collins M.E.* Agricultural geophysics: past, present, and future // 23rd EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. 2010. P. 190–202. DOI: [10.4133/1.3445432](https://doi.org/10.4133/1.3445432)
14. *Allred B.J.* A GPR agricultural drainage pipe detection case study: Effects of antenna orientation relative to drainage pipe directional trend // Journal of Environmental & Engineering Geophysics. 2013. Vol. 18. No. 1. P. 55–69. DOI: [10.2113/JEEG18.1.55](https://doi.org/10.2113/JEEG18.1.55).
15. *André F., Jonard F., Jonard M., Lambot S.* In situ characterization of forest litter using ground-penetrating radar // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2016. Vol. 121. No. 3. P. 879–894. DOI: [10.1002/2015JG002952](https://doi.org/10.1002/2015JG002952).
16. *Annan A.P.* Ground penetrating radar principles, procedures and applications. Mississauga: Sensors&Software, 2003. 278 p.
17. *Ardekani M.R.M.* Off- and on-ground GPR techniques for field-scale soil moisture mapping // Geoderma. 2013. Vol. 200–201. P. 55–66. DOI: [10.1016/j.geoderma.2013.02.010](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.02.010).
18. *Bechtel T., Truskavetsky S., Pochanin G., Capineri L., Sherstyuk A., Viatkin K., Byndych T., Ruban V., Varyanitzha-Roschupkina L., Orlenko O., Kholod P., Falorni P., Bulletti A., Bossi L., Crawford F.* Characterization of electromagnetic properties of in situ soils for the design of landmine detection sensors: Application in Donbass, Ukraine // Remote Sensing. 2019. Vol. 11. No. 1232. P. 1–16. DOI: [10.3390/rs11101232](https://doi.org/10.3390/rs11101232).
19. *Boll J., van Rijn R.P.G., Weiler K.W., Ewen J.A., Daliparthi J., Herbert S.J., Steenhuis T.S.* Using ground-penetrating radar to detect layers in a sandy field soil // Geoderma. 1996. Vol. 70. No. 2–4. P. 117–132. DOI: [10.1016/0016-7061\(95\)00077-1](https://doi.org/10.1016/0016-7061(95)00077-1).
20. *Borden K.A., Thomas S.C., Isaac M.E.* Interspecific variation of tree root architecture in a temperate agroforestry system characterized using ground-penetrating radar // Plant Soil. 2017. Vol. 410. P. 323–334. DOI: [10.1007/s11104-016-3015-x](https://doi.org/10.1007/s11104-016-3015-x).
21. *Butnor J.R., Doolittle J.A., Kress L., Cohen S., Johnsen K.H.* Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States // Tree Physiology. 2001. Vol. 21. No. 17. P. 1269–1278. DOI: [10.1093/treephys/21.17.1269](https://doi.org/10.1093/treephys/21.17.1269).
22. *Butnor J.R., Campbell J.L., Shanley J.B., Zarnoch S.J.* Measuring soil frost depth in forest ecosystems with ground penetrating radar // Agricultural and

Forest Meteorology. 2014. Vol. 192–193. P. 121–131. DOI: [10.1007/s11104-015-2768-y](https://doi.org/10.1007/s11104-015-2768-y).

23. *Cassidy N.J.* Evaluating LNAPL contamination using GPR signal attenuation analysis and dielectric property measurements: Practical implications for hydrological studies // Journal of Contaminant Hydrology. 2007. Vol. 94. No. 1–2. P. 49–75. DOI: [10.1016/j.jconhyd.2007.05.002](https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2007.05.002).

24. *Collins M.E., Doolittle J.A.* Using ground-penetrating radar to study soil microvariability // Soil Science Society of America Journal. 1987. Vol. 51. No. 2. P. 491–493. DOI: [10.2136/sssaj1987.03615995005100020045x](https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100020045x).

25. *Daniels J.J., Roberts R., Vendl M.* Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants // Journal of Applied Geophysics. 1995. Vol. 33. No. 1–3. P. 195–207. DOI: [10.1016/0926-9851\(95\)90041-1](https://doi.org/10.1016/0926-9851(95)90041-1).

26. *De Benedetto D., Montemurro F., Diacono M.* Mapping an agricultural field experiment by electromagnetic Induction and ground penetrating radar to improve soil water content estimation // Agronomy. 2019. Vol. 9. No. 638. P. 1–16. DOI: [10.3390/agronomy9100638](https://doi.org/10.3390/agronomy9100638).

27. *Doolittle, J.A., Collins M.E.* Use of soil information to determine application of ground penetrating radar // Journal of Applied Geophysics. 1995. Vol. 33. No. 1–3. P. 101–108. DOI: [10.1016/0926-9851\(95\)90033-0](https://doi.org/10.1016/0926-9851(95)90033-0)

28. *Doolittle J.A., Minzenmayer F.E., Waltman S.W., Benham E.C., Tuttle J.W., Peaslee S.D.* Ground-penetrating radar soil suitability map of the conterminous United States // Geoderma. 2007. Vol. 141. No. 3–4. P. 416–421. DOI: [10.1016/j.geoderma.2007.05.015](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.05.015).

29. *Doolittle J.A., Butnor J.R.* Soils, peatlands, and biomonitoring // Ground penetrating radar. Theory and Applications. 2009. P. 179–202. DOI: [10.1016/B978-0-444-53348-7.00006-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.00006-5).

30. *Doolittle J., Dobos R., Peaslee S., Waltman S., Benham E., Tuttle W.* Revised ground-penetrating radar soil suitability maps // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. 2010. Vol. 15. No. 3. P. 111–118. DOI: [10.2113/JEEG15.3.111](https://doi.org/10.2113/JEEG15.3.111).

31. *Doolittle J.A., Brevik E.C.* The use of electromagnetic induction techniques in soils studies // Geoderma. 2014. Vol. 223–225. P. 33–45. DOI: [10.1016/j.geoderma.2014.01.027](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.027).

32. *Grote K., Anger C., Kelly B., Hubbard S., Rubin Y.* Characterization of soil water content variability and soil texture using GPR ground wave techniques // Journal of Environmental and Engineering Geophysics. 2010. Vol. 15. No. 3. P. 93–110. DOI: [10.2113/JEEG15.3.93](https://doi.org/10.2113/JEEG15.3.93).

33. *Guo L., Chen J., Cui X.H., Fan B.H., Lin H.* Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification: A review // Plant and Soil. 2013. Vol. 362. P. 1–23. DOI: [10.1007/s11104-012-1455-5](https://doi.org/10.1007/s11104-012-1455-5).

34. *Hruška J., Čermák J., Sustek S.* Mapping tree root systems with ground-penetrating radar // *Tree Physiology*. 1999. Vol. 19. P. 125–130. DOI: [10.1093/treephys/19.2.125](https://doi.org/10.1093/treephys/19.2.125).
35. *Huisman J.A., Hubbard S.S., Redman J.D., Annan A.P.* Measuring soil water content with ground penetrating radar: A review // *Vadose Zone Journal*. 2003. Vol. 2. No. 4. P. 476–491. DOI: [10.2136/vzj2003.4760](https://doi.org/10.2136/vzj2003.4760).
36. *Igel J.* On the small-scale variability of electrical soil properties and its influence on geophysical measurements: PhD Thesis. Frankfurt am Main, 2007. 173 p.
37. *Ikazaki K., Nagumo F., Simporé S., Barro A.* Soil toposequence, productivity, and a simple technique to detect petroplinthites using ground-penetrating radar in the Sudan Savanna // *Soil Science and Plant Nutrition*. 2018. Vol. 64. No. 5. P. 623–631. DOI: [10.1080/00380768.2018.1502604](https://doi.org/10.1080/00380768.2018.1502604).
38. *James I.T., Waine T.W., Bradley R.I., Taylor J.C., Godwin R.J.* Determination of Soil Type Boundaries using Electromagnetic Induction Scanning Techniques // *Biosystems Engineering*. 2003. Vol. 86. No. 4. P. 421–430. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2003.09.001](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.09.001).
39. *Léger E., Dafflon B., Soom F., Peterson J., Ulrich C., Hubbard S.* Quantification of Arctic soil and permafrost properties using ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography datasets // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2017. Vol. 10. No. 10. P. 4348–4359. DOI: [10.1109/JSTARS.2017.2694447](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2694447).
40. *Liu X., Dong X., Leskovar D.I.* Ground penetrating radar for underground sensing in agriculture: a review // *International Agrophysics*. 2016. Vol. 30. P. 533–543. DOI: [10.1515/intag-2016-0010](https://doi.org/10.1515/intag-2016-0010).
41. *Lunt I.A., Hubbard S.S., Rubin Y.* Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data // *Journal of Hydrology*. 2005. Vol. 307. No. 1–4. P. 254–269. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2004.10.014](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.014).
42. *McKee A.M.* The application of ground penetrating radar at the Kanorado locality, northwest Kansas: Master`s Thesis. Lawrence, 2009. 90 p.
43. *Minet J., Bogaert P., Vanclooster M., Lambot S.* Validation of ground penetrating radar full-waveform inversion for field scale soil moisture mapping // *Journal of Hydrology*. 2012. Vol. 424–425. P. 112–123. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2011.12.034](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.034).
44. *Pogosyan L., Sedov S., Pi-Puig T., Ryazantsev P., Rodionov A., Yudina A., Krasilnikov P.* Pedogenesis of a Retisol with fragipan in Karelia in the context of the Holocene landscape evolution // *Baltica*. 2018. Vol. 31. No. 2. P. 134–145. DOI: [10.5200/baltica.2018.31.13](https://doi.org/10.5200/baltica.2018.31.13).
45. *Robinson D.A., Jones S.B., Wraith J.M., Or D., Friedman S.P.* A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soils

- Using Time Domain Reflectometry // *Vadose Zone Journal*. 2003. Vol. 2. P. 444–475. DOI: [10.2113/2.4.444](https://doi.org/10.2113/2.4.444).
46. *Rejšek K., Hruška J., Kuba L., Tichá R., Drobný D., Formánek P., Vranová V.* A methodological contribution to use of Ground-penetrating radar (GPR) as a tool for monitoring contamination of urban soils with road salt // *Urban Ecosystems*. 2015. Vol. 18. P. 169–188. DOI: [10.1007/s11252-014-0391-y](https://doi.org/10.1007/s11252-014-0391-y).
47. *Samouëlian A., Cousin I., Tabbagh A., Bruand A., Richarde G.* Electrical resistivity survey in soil science: a review // *Soil & Tillage Research*. 2005. Vol. 83. P. 173–193. DOI: [10.1016/j.still.2004.10.004](https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004).
48. *Shih S.F., Myhre D.L.* Ground-penetrating radar for salt-affected soil assessment // *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 1994. Vol. 120. No. 2. P. 322–333.
49. *Simeoni M.A., Galloway P.D., O'Neil A.J., Gilkes R.J.* A procedure for mapping the depth to the texture contrast horizon of duplex soils in south-western Australia using ground penetrating radar, GPS and kriging // *Australian Journal of Soil Research*. 2009. Vol. 47. P. 613–621. DOI: [10.1071/SR08241](https://doi.org/10.1071/SR08241).
50. *Steelman C.M., Endres A.L., Jones J.P.* High-resolution ground-penetrating radar monitoring of soil moisture dynamics: Field results, interpretation, and comparison with unsaturated flow model // *Water resources research*. 2012. Vol. 48. W09538. P. 1–17. DOI: [10.1029/2011WR011414](https://doi.org/10.1029/2011WR011414).
51. *Steelman C.M., Endres A.L., van der Kruk J.* Field observations of shallow freeze and thaw processes using high-frequency ground-penetrating radar // *Hydrological Processes*. 2010. Vol. 24. P. 2022–2033. DOI: [10.1002/hyp.7688](https://doi.org/10.1002/hyp.7688).
52. *Stover D.B., Day F.P., Butnor J.R., Drake B.G.* Effect of elevated CO<sub>2</sub> on coarse-root biomass in Florida scrub detected by ground-penetrating radar // *Ecology*. 2007. Vol. 88. No. 5. P. 1328–1334. DOI: [10.1890/06-0989](https://doi.org/10.1890/06-0989).
53. *Szuch R.P., White J.G., Vepraskas M.J., Doolittle J.A.* Application of ground penetrating radar to aid restoration planning for a drained Carolina bay // *Wetlands*. 2006. Vol. 26. No. 1. P. 205–216.
54. *Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P.* Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines // *Water Resources Research*. 1980. Vol. 16. P. 574–582.
55. *Tsoflias G.P., Becker M.W.* Ground-penetrating radar response to fracture-fluid salinity: Why lower frequencies are favorable for resolving salinity changes // *Geophysics*. 2008. Vol. 73. No. 5. P. 25–30. DOI: [10.1190/1.2957893](https://doi.org/10.1190/1.2957893).
56. *Weiermüller L., Huisman J.A., Lambot S., Herbst M., Vereecken H.* Mapping the spatial variation of soil water content at the field scale with

- different ground penetrating radar techniques // Journal of Hydrology. 2007. Vol. 340. P. 205–216. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2007.04.013](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.04.013).
57. Winkelbauer J., Völkel J., Leopold M., Berni N. Methods of surveying the thickness of humous horizons using ground penetrating radar (GPR): an example from the Garmisch-Partenkirchen area of the Northern Alps // European Journal of Forest Research. 2011. Vol. 130. P. 799–812. DOI: [10.1007/s10342-010-0472-2](https://doi.org/10.1007/s10342-010-0472-2).
58. Zajíčová K., Chumana T. Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review // Geoderma. 2019. Vol. 343. P. 116–129. DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.02.024](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.024).
59. Zhang J., Lin H., Doolittle J. Soil layering and preferential flow impacts on seasonal changes of GPR signals in two contrasting soils // Geoderma. 2014. Vol. 213. P. 560–569. DOI: [10.1016/j.geoderma.2013.08.035](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.035)

## REFERENCES

1. Bahmet O.N., *Litogennye pochvy, sformirovavshiesya na shungitovykh slantsakh. Putevoditel' pochvennoi ekskursii* (Kizhi island. Lithogenic soils formed on schungite schists. Soil excursion guide), Petrozavodsk: KarNTs RAN, 2012, 44 p.
2. Bobrov P.P., Belyaeva T.A., Kroshka E.S., Rodionova O.V., *Opreделение vlazhnosti obratstov pochv dielektricheskim metodom* (Soil moisture measurement by the dielectric method), *Pochvovedenie*, 2019, No. 7, pp. 859–871, DOI: [10.1134/S0032180X19050034](https://doi.org/10.1134/S0032180X19050034).
3. Vladov M.L., Sudakova M.S., *Georadiolokatsiya: ot fizicheskikh osnov do perspektivnykh napravlenii* (Ground penetrating radar: from the physical foundations to promising areas), Moscow: GEOS, 2017, 240 p.
4. Morozova R.M., Fedorec N.G., Bahmet O.N., *Pochvy i pochvennyi pokrov Zaonezh'ya Karelii* (Soils and soil cover Zaonezhye Karelia), *Trudy KarNTs RAN*, 2004, Vol. 6, pp. 69–89.
5. Pozdnyakov A.I., *Polevaya elektrofizika pochv* (Field Electrophysics of Soils), Moscow: MAIK “Nauka/Interperiodika”, 2001, 187 p.
6. Fedorec N.G., *Raznoobrazie pochv i bioraznoobrazie v lesnykh ekosistemakh srednei taigi* (Soil diversity and biodiversity in forest ecosystems of the middle taiga), Moscow: Nauka, 2006, 287 p.
7. Ryazancev P.A., Bahmet O.N., *Ispol'zovanie elektrorazvedochnykh metodov dlya kartirovaniya pochvennykh neodnorodnostei* (Application of geoelectric methods for mapping soil heterogeneity), *Pochvovedenie*, 2020, No. 5, pp. 535–546, DOI: [10.31857/S0032180X20050123](https://doi.org/10.31857/S0032180X20050123).
8. Starovojtov A.V., *Interpretatsiya georadiolokatsionnykh dannykh* (Interpretation of GPR data), Moscow: Moscow State University, 2008, 191 p.

9. Chudinova S.M., Dielektricheskie pokazateli pochvy i kategorii pochvennoi vlagi (Dielectric characteristics of soils and categories of soil water), *Pochvovedenie*, 2009, No. 4, pp. 441–451.
10. Afshar F.A., Ayoubi S., Castrignanò A., Quarto R., Ardekani M.R.M., Using ground-penetrating radar to explore the cemented soil horizon in an arid region in Iran, *Near Surface Geophysics*, 2017, Vol. 15, No. 1, pp. 103–110, DOI: [10.3997/1873-0604.2016049](https://doi.org/10.3997/1873-0604.2016049).
11. al Hagrey S.A., Müller C., GPR study of pore water content and salinity in sand, *Geophysical Prospecting*, 2000, Vol. 48, No. 1, pp. 63–85, DOI: [10.1046/j.1365-2478.2000.00180.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2000.00180.x).
12. Allred B.J., Daniels J.J., Ehsani M.R. (Eds.), *Handbook of Agricultural Geophysics*, Boca Raton: CRC Press, 2008, 432 p., DOI: [10.1201/9781420019353](https://doi.org/10.1201/9781420019353).
13. Allred B.J., Freeland R.S., Farahani H.J., Collins M.E., Agricultural geophysics: past, present, and future, *23rd EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, 2010, pp. 190–202, DOI: [10.4133/1.3445432](https://doi.org/10.4133/1.3445432).
14. Allred B.J., A GPR agricultural drainage pipe detection case study: Effects of antenna orientation relative to drainage pipe directional trend, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2013, Vol. 18, No. 1, pp. 55–69, DOI: [10.2113/JEEG18.1.55](https://doi.org/10.2113/JEEG18.1.55).
15. André F., Jonard F., Jonard M., Lambot S., In situ characterization of forest litter using ground-penetrating radar, *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, Vol. 121, No. 3, pp. 879–894, DOI: [10.1002/2015JG002952](https://doi.org/10.1002/2015JG002952).
16. Annan A.P., *Ground penetrating radar principles, procedures and applications*, Mississauga: Sensors & Software, 2003, 278 p.
17. Ardekani M.R.M., Off- and on-ground GPR techniques for field-scale soil moisture mapping, *Geoderma*, 2013, Vol. 200–201, pp. 55–66, DOI: [10.1016/j.geoderma.2013.02.010](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.02.010).
18. Bechtel T., Truskavetsky S., Pochanin G., Capineri L., Sherstyuk A., Viatkin K., Byndych T., Ruban V., Varyanitzha-Roschupkina L., Orlenko O., Khodod P., Falorni P., Bulletti A., Bossi L., Crawford F., Characterization of electromagnetic properties of in situ soils for the design of landmine detection sensors: Application in Donbass, Ukraine, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 1232, pp. 1–16, DOI: [10.3390/rs11101232](https://doi.org/10.3390/rs11101232).
19. Boll J., van Rijn R.P.G., Weiler K.W., Ewen J.A., Daliparthi J., Herbert S.J., Steenhuis T.S., Using ground-penetrating radar to detect layers in a sandy field soil, *Geoderma*, 1996, Vol. 70, No. 2–4, pp. 117–132, DOI: [10.1016/0016-7061\(95\)00077-1](https://doi.org/10.1016/0016-7061(95)00077-1).

20. Borden K.A., Thomas S.C., Isaac M.E., Interspecific variation of tree root architecture in a temperate agroforestry system characterized using ground-penetrating radar, *Plant Soil*, 2017, Vol. 410, pp. 323–334, DOI: [10.1007/s11104-016-3015-x](https://doi.org/10.1007/s11104-016-3015-x).
21. Butnor J.R., Doolittle J.A., Kress L., Cohen S., Johnsen K.H., Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United States, *Tree Physiology*, 2001, Vol. 21, No. 17, pp. 1269–1278, DOI: [10.1093/treephys/21.17.1269](https://doi.org/10.1093/treephys/21.17.1269).
22. Butnor J.R., Campbell J.L., Shanley J.B., Zarnoch S.J., Measuring soil frost depth in forest ecosystems with ground penetrating radar, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, Vol. 192–193, pp. 121–131, DOI: [10.1007/s11104-015-2768-y](https://doi.org/10.1007/s11104-015-2768-y).
23. Cassidy N.J., Evaluating LNAPL contamination using GPR signal attenuation analysis and dielectric property measurements: Practical implications for hydrological studies, *Journal of Contaminant Hydrology*, 2007, Vol. 94, No. 1–2, pp. 49–75, DOI: [10.1016/j.jconhyd.2007.05.002](https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2007.05.002).
24. Collins M.E., Doolittle J.A., Using ground-penetrating radar to study soil microvariability, *Soil Science Society of America Journal*, 1987, Vol. 51, No. 2, pp. 491–493, DOI: [10.2136/sssaj1987.03615995005100020045x](https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100020045x).
25. Daniels J.J., Roberts R., Vendl M., Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants, *Journal of Applied Geophysics*, 1995, Vol. 33, No. 1–3, pp. 195–207, DOI: [10.1016/0926-9851\(95\)90041-1](https://doi.org/10.1016/0926-9851(95)90041-1).
26. De Benedetto D., Montemurro F., Diacono M., Mapping an agricultural field experiment by electromagnetic Induction and ground penetrating radar to improve soil water content estimation, *Agronomy*, 2019, Vol. 9, No. 638, pp. 1–16, DOI: [10.3390/agronomy9100638](https://doi.org/10.3390/agronomy9100638).
27. Doolittle J.A., Collins M.E., Use of soil information to determine application of ground penetrating radar, *Journal of Applied Geophysics*, 1995, Vol. 33, No. 1–3, pp. 101–108, DOI: [10.1016/0926-9851\(95\)90033-0](https://doi.org/10.1016/0926-9851(95)90033-0).
28. Doolittle J.A., Minzenmayer F.E., Waltman S.W., Benham E.C., Tuttle J.W., Peaslee S.D., Ground-penetrating radar soil suitability map of the conterminous United States, *Geoderma*, 2007, Vol. 141, No. 3–4, pp. 416–421, DOI: [10.1016/j.geoderma.2007.05.015](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.05.015).
29. Doolittle J.A., Butnor J.R., Soils, peatlands, and biomonitoring, In: *Ground penetrating radar. Theory and applications*, 2009, pp. 179–202, DOI: [10.1016/B978-0-444-53348-7.00006-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53348-7.00006-5).
30. Doolittle J., Dobos R., Peaslee S., Waltman S., Benham E., Tuttle W., Revised ground-penetrating radar soil suitability maps, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2010, Vol. 15, No. 3, pp. 111–118, DOI: [10.2113/JEEG15.3.111](https://doi.org/10.2113/JEEG15.3.111).

31. Doolittle J.A., Brevik E.C., The use of electromagnetic induction techniques in soils studies, *Geoderma*, 2014, Vol. 223–225, pp. 33–45, DOI: [10.1016/j.geoderma.2014.01.027](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.027).
32. Grote K., Anger C., Kelly B., Hubbard S., Rubin Y., Characterization of soil water content variability and soil texture using GPR ground wave techniques, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2010, Vol. 15, No. 3, pp. 93–110, DOI: [10.2113/JEEG15.3.93](https://doi.org/10.2113/JEEG15.3.93).
33. Guo L., Chen J., Cui X.H., Fan B.H., Lin H., Application of ground penetrating radar for coarse root detection and quantification: A review, *Plant and Soil*, 2013, Vol. 362, pp. 1–23, DOI: [10.1007/s11104-012-1455-5](https://doi.org/10.1007/s11104-012-1455-5).
34. Hruška J., Čermák J., Sustek S., Mapping tree root systems with ground-penetrating radar, *Tree Physiology*, 1999, Vol. 19, pp. 125–130, DOI: [10.1093/treephys/19.2.125](https://doi.org/10.1093/treephys/19.2.125).
35. Huisman J.A., Hubbard S.S., Redman J.D., Annan A.P., Measuring soil water content with ground penetrating radar: A review, *Vadose Zone Journal*, 2003, Vol. 2, No. 4, pp. 476–491, DOI: [10.2136/vzj2003.4760](https://doi.org/10.2136/vzj2003.4760).
36. Igel J., *On the small-scale variability of electrical soil properties and its influence on geophysical measurements: PhD Thesis*. Frankfurt am Main, 2007, 173 p.
37. Ikazaki K., Nagumo F., Simporé S., Barro A., Soil toposequence, productivity, and a simple technique to detect petroplinthites using ground-penetrating radar in the Sudan Savanna, *Soil Science and Plant Nutrition*, 2018, Vol. 64, No. 5, pp. 623–631, DOI: [10.1080/00380768.2018.1502604](https://doi.org/10.1080/00380768.2018.1502604).
38. James I.T., Waive T.W., Bradley R.I., Taylor J.C., Godwin R.J., Determination of Soil Type Boundaries using Electromagnetic Induction Scanning Techniques, *Biosystems Engineering*, 2003, Vol. 86, No. 4, pp. 421–430, DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2003.09.001](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2003.09.001).
39. Léger E., Dafflon B., Soom F., Peterson J., Ulrich C., Hubbard S., Quantification of Arctic soil and permafrost properties using ground-penetrating radar and electrical resistivity tomography datasets, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, Vol. 10, No. 10, pp. 4348–4359, DOI: [10.1109/JSTARS.2017.2694447](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2694447).
40. Liu X., Dong X., Leskovar D.I., Ground penetrating radar for underground sensing in agriculture: a review, *International Agrophysics*, 2016, Vol. 30, pp. 533–543, DOI: [10.1515/intag-2016-0010](https://doi.org/10.1515/intag-2016-0010).
41. Lunt I.A., Hubbard S.S., Rubin Y., Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data, *Journal of Hydrology*, 2005, Vol. 307, No. 1–4, pp. 254–269, DOI: [10.1016/j.jhydrol.2004.10.014](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.014).
42. McKee A.M., *The application of ground penetrating radar at the Kanorado locality, northwest Kansas: Master's Thesis*, Lawrence, 2009, 90 p.



43. Minet J., Bogaert P., Vanclooster M., Lambot S., Validation of ground penetrating radar full-waveform inversion for field scale soil moisture mapping, *Journal of Hydrology*, 2012, Vol. 424–425, pp. 112–123, DOI: [10.1016/j.jhydrol.2011.12.034](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.034).
44. Pogosyan L., Sedov S., Pi-Puig T., Ryazantsev P., Rodionov A., Yudina A., Krasilnikov P., Pedogenesis of a retisol with fragipan in Karelia in the context of the Holocene landscape evolution, *Baltica*, 2018, Vol. 31, No. 2, pp. 134–145, DOI: [10.5200/baltica.2018.31.13](https://doi.org/10.5200/baltica.2018.31.13).
45. Robinson D.A., Jones S.B., Wraith J.M., Or D., Friedman S.P., A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using Time domain reflectometry, *Vadose Zone Journal*, 2003, Vol. 2, pp. 444–475, DOI: [10.2113/2.4.444](https://doi.org/10.2113/2.4.444).
46. Rejšek K., Hruška J., Kuba L., Tichá R., Drobný D., Formánek P., Vranová V., A methodological contribution to use of Ground-penetrating radar (GPR) as a tool for monitoring contamination of urban soils with road salt, *Urban Ecosystems*, 2015, Vol. 18, pp. 169–188, DOI: [10.1007/s11252-014-0391-y](https://doi.org/10.1007/s11252-014-0391-y).
47. Samouëlian A., Cousin I., Tabbagh A., Bruand A., Richarde G., Electrical resistivity survey in soil science: a review, *Soil & Tillage Research*, 2005, Vol. 83, pp. 173–193, DOI: [10.1016/j.still.2004.10.004](https://doi.org/10.1016/j.still.2004.10.004).
48. Shih S.F., Myhre D.L., Ground-penetrating radar for salt-affected soil assessment, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1994, Vol. 120, No. 2, pp. 322–333.
49. Simeoni M.A., Galloway P.D., O’Neil A.J., Gilkes R.J., A procedure for mapping the depth to the texture contrast horizon of duplex soils in southwestern Australia using ground penetrating radar, GPS and kriging, *Australian Journal of Soil Research*, 2009, Vol. 47, pp. 613–621, DOI: [10.1071/SR08241](https://doi.org/10.1071/SR08241).
50. Steelman C.M., Endres A.L., Jones J.P., High-resolution ground-penetrating radar monitoring of soil moisture dynamics: Field results, interpretation, and comparison with unsaturated flow model, *Water resources research*, 2012, Vol. 48, W09538, pp. 1–17, DOI: [10.1029/2011WR011414](https://doi.org/10.1029/2011WR011414).
51. Steelman C.M., Endres A.L., van der Kruk J., Field observations of shallow freeze and thaw processes using high-frequency ground-penetrating radar, *Hydrological Processes*, 2010, Vol. 24, pp. 2022–2033, DOI: [10.1002/hyp.7688](https://doi.org/10.1002/hyp.7688).
52. Stover D.B., Day F.P., Butnor J.R., Drake B.G., Effect of elevated CO<sub>2</sub> on coarse-root biomass in Florida scrub detected by ground-penetrating radar, *Ecology*, 2007, Vol. 88, No. 5, pp. 1328–1334, DOI: [10.1890/06-0989](https://doi.org/10.1890/06-0989).

53. Szuch R.P., White J.G., Vepraskas M.J., Doolittle J.A., Application of ground penetrating radar to aid restoration planning for a drained Carolina bay, *Wetlands*, 2006, Vol. 26, No. 1, pp. 205–216.
54. Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P., Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines, *Water Resources Research*, 1980, Vol. 16, pp. 574–582.
55. Tsoflias G.P., Becker M.W., Ground-penetrating radar response to fracture-fluid salinity: Why lower frequencies are favorable for resolving salinity changes, *Geophysics*, 2008, Vol. 73, No. 5, pp. 25–30, DOI: [10.1190/1.2957893](https://doi.org/10.1190/1.2957893).
56. Weihermüller L., Huisman J.A., Lambot S., Herbst M., Vereecken H., Mapping the spatial variation of soil water content at the field scale with different ground penetrating radar techniques, *Journal of Hydrology*, 2007, Vol. 340, pp. 205–216, DOI: [10.1016/j.jhydrol.2007.04.013](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.04.013).
57. Winkelbauer J., Völkel J., Leopold M., Bernt N., Methods of surveying the thickness of humous horizons using ground penetrating radar (GPR): an example from the Garmisch-Partenkirchen area of the Northern Alps, *European Journal of Forest Research*, 2011, Vol. 130, pp. 799–812, DOI: [10.1007/s10342-010-0472-2](https://doi.org/10.1007/s10342-010-0472-2).
58. Zajícová K., Chumana T., Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review, *Geoderma*, 2019, Vol. 343, pp. 116–129, DOI: [10.1016/j.geoderma.2019.02.024](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.024).
59. Zhang J., Lin H., Doolittle J., Soil layering and preferential flow impacts on seasonal changes of GPR signals in two contrasting soils, *Geoderma*, 2014, Vol. 213, pp. 560–569, DOI: [10.1016/j.geoderma.2013.08.035](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.035).