#### УДК 631.421

# КРИТЕРИИ ИДЕНТИФИКАЦИИ СТРОЕНИЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ПОЧВЕННОГО ПРОФИЛЯ В ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОРАДАРА "ЛОЗА-В"

### © 2015 г.А.Я.Воронин

Почвенный институт им. В.В. Докучаева, 119017, Россия, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2 e-mail: avoron46@gmail.com

Рассмотрены вопросы установления значимых критериев идентификации строения почвенного профиля и некоторых функциональных его свойств при интерпретации радарограмм, полученных при георадиолокационном профилировании различных территорий геофизическим прибором "Лоза-В". Помимо стандартного набора приемов первичной цифровой обработки радарограмм. построения временной развертки отраженного импульса по трассам зондирования и преобразования её в глубинную, предлагается широко использовать информацию об изменчивости динамических характеристик волнового поля в однородных средах. Информация включает выявление возмущений волнового поля (всплесков), установление точек дифракции (осей синфазности), соответствующих локальным горизонтам и объектам, расчет частотных характеристик распределения отраженных сигналов в почвенном профиле. Простой однородный слой имеет периодическую последовательность пиков в амплитудном спектре суммарного отражения от кровли до подошвы этого пласта. Изменчивость мощности почвенного горизонта рассчитывается через анализ локальных значений амплитудных максимумов отраженных импульсов на радарограмме. Процедура верификации почв, базирующаяся на сравнении реальных почвенных профилей и шаблонов в рамках конкретного классификатора, проводится с помощью статистических методов расчета полиномиальных функций значений амплитуды сигнала по его длительности. Статистическая обработка включает расчет средних значений, стандартных отклонений и частот распределения амплитуды сигналов, которые функционально связаны с мошностью слоя и количеством оснилляний сигналов.

Показатели спектрального преобразования Фурье (частота, период, спектральная плотность), наряду с трендовыми характеристиками полиноминальных модуляций, становятся основными критериями при двухступенчатой идентификации почв. Несмотря на всю привлекательность спектрального преобразования Фурье, расчет трендовых моделей и проверка результатов их тождественности с шаблоном осуществляются по полевым данным буровых скважин и почвенных разрезов.

*Ключевые слова:* амплитуда отраженного импульса, георадар, идентификация, почвы, радарограмма, спектральная плотность, тренд.

Принцип действия георадара основан на зондировании электромагнитными импульсами земной поверхности на различную глубину и восстановлении картины раздела сред с различной диэлектрической проницаемостью по отраженному сигналу (Владов и др., 2001; Янковский, 2005; Любушкин, 2007; Старовойтов, 2008). Этот подход можно рассматривать в качестве одного из направлений гносеологического познания природных объектов, в том числе и почвенного покрова, и формирования картины пространственной организации территории. Механизм такой организации, ее векторная составляющая важны для реализации создаваемых управленческих моделей природных объектов. Именно фактор универсальности, малой затратности, высокой скорости проведения полевых исследований может явиться приоритетом в использовании данного направления в реализации различных экономических, экологических, природоохранных проектов страны.

За последние десятилетия георадиолокация как неразрушающий метод успешно используется при изучении подповерхностных сред. Специалистами накоплен огромный положительный опыт как в проведении полевых работ, так и в приемах обработки и интерпретации георадиолокационных данных. Области применения георадарных обследований обширны – геология, строительство, археология, экология и др. (Методические..., 2003).

В почвенных исследованиях таких работ также становится все больше (Золотая и др., 2004; Калинкевич и др., 2007; Пягай и др., 2009; Fisher, 2013; Белобров и др., 2013; Воронин и др., 2013). Это связано со спецификой функционирования почвенного тела, как целостного образования с определенным набором генетических горизонтов, системой почвенных режимов и плодородием, но развивающегося в рамках однородной геологической среды (почвообразующей породы). Это обстоятельство вносит существенные коррективы в обработку радарограмм.

Одной из основных причин, препятствующих широкому распространению георадарных технологий в почвоведении, является отсутствие методов идентификации почв в таких исследованиях, отсутствие критериев верификации диагностических параметров почвенных тел с вероятностными моделями поведения отраженных электромагнитных импульсов в подповерхностной среде. В ряде работ выдвигается положение о невозможности разработки таких критериев, поскольку формы зондирующего и отраженных импульсов в значительной мере формируются самой изучаемой средой (Копейкин, 2012). При этом требования к критериям идентификации о наличии типичности, объективности, сопоставимости и проверяемости нарушаются.

Практически во всех программах обработки георадарных данных предусмотрен стандартный набор приемов цифровой обработки сигналов: частотная фильтрация, вычитание среднего, сглаживание, выделение огибающей сигналов, настройка параметров визуализации и т.п., а в некоторых реализована возможность автоматизированного выделения и анализа поля обратного рассеяния и построения разреза по целому ряду атрибутов волнового поля и параметров исследуемой среды, вычисленных на основе данных атрибутов (Денисов и др., 2010).

Но этого недостаточно для установления значимых критериев идентификации почв при анализе динамических характеристик радарограмм (амплитуды, частоты и т.д.). Например, однородность материнской породы затрудняет диагностику глубинного разделения исследуемой толщи, вследствие возможного отсутствия осей синфазности.

Цель работы – разработать технологию интерпретации данных георадарного профилирования для оценки строения, свойств и состояния почв и почвенного покрова.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ и обработка данных при георадиолокационных исследованиях, проводимых геофизическим прибором "Лоза-В", осуществляется в специализированной программе Крот (Резников и др., 2000; Пягай и др., 2009; Пягай и др., 2013). Алгоритм обработки включает: установку параметров георадарных профилей (блок 2), цифровую фильтрацию данных, которая реализована в двух опциях: вертикальной и горизонтальной одномерной фильтрации (блок 3), вычисление средней скорости распространения волны в грунте (блок 4), ручную прорисовку границ слоев с разной диэлектрической проницаемостью. Интерпретация результатов георадарного зондирования завершается преобразованием временной шкалы радарограммы в глубинную (Методические..., 2003). Результаты зондирования в волновых формах при открытии в программе Крот могут представляться в цветных или в серых тонах картинках. Палитра из 128 цветов позволяет получить наглядную картину амплитудно-фазовых характеристик георадарного разреза. Такая предварительная обработка радарограмм характерна для абсолютно всех георадиолокационных исследований независимо от целей и объекта.

Для получения информации об изменчивости почвенного профиля, помимо вышеприведенных обработок, необходимо дополнительно проанализировать динамические характеристики его волнового поля. Этот анализ выполняется в рамках выявления пространственно-временных возмущений (всплесков) отраженных импульсов поля, восстановления точек дифракции, соответствующих локальным горизонтам и объектам, определения частотных характеристик возмущений электромагнитных нерегулярных и регулярных полезных отраженных волн.

Если толща состоит из диэлектрических контрастных пород, то оси синфазности<sup>1</sup>, соответствующие границам дифференциации почвенного профиля, уверенно отыскиваются на радарограмме. Если характеристики породы меняются плавно, то оси синфазности, которые соответствовали бы искомым границам, на радарограмме трудно выделяемы или отсутствуют. Поэтому основываться при обработке данных только на определенной форме импульса недостаточно, необходимо предусмотреть возможность вариаций

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Ось синфазности – линия на радарограмме, соединяющая локальные максимумы (экстремумы) значений амплитуды отраженного импульса одинаковой фазы в интервале его регистрации.

параметров. Преодолеть эту ситуацию при почвенных исследованиях позволяет процедура верификации почв, базирующейся на сравнении реальных профилей и шаблонов в рамках конкретного классификатора (Классификация..., 1977), с помощью статистических методов расчета полиномиальных и экспоненциальных функций трендовых значений амплитуды сигнала по глубине профиля. В этом случае вариация изменения амплитуды сигналов может обрабатываться статистически по установленному стандартному шагу глубины профиля. Также рассчитываются стандартное отклонение и частота распределения, которые функционально связаны с шириной слоя и количеством осцилляций сигналов.

Моделирование поверхности полученных показателей осуществляется методом Inverse Distance, power-2 в программе Voxler 3.

Перспективными в области разработки критериев идентификации почв являются спектральные преобразования данных георадарного зондирования. Расчет общей спектральной плотности ряда и долей плотности, приходящейся на основной период колебаний сигнала и приуроченной к определенной частоте, представляет расчетный коэффициент изменения почвенной толщи за определенный промежуток времени. Показатели спектрального преобразования Фурье (частота, период, спектральная плотность), наряду с характеристиками полиноминальных модуляций, становятся основными критериями при двухступенчатой идентификации почв.

Характер неоднородности почвенного профиля оценивается по цифровым данным осциллирующего импульса с затуханием, функция которого многократно пересекает нулевую ось. Проводится фрактальный анализ данной функции с расчетом показателя Херста, фрактальной размерности. Обработка данных позволяет получить синтетические карты пространственного размещения фрактальных показателей на территории изучаемых участков.

Эти методы и критерии идентификации почв предполагают пространственно-геометрическую оценку расположения почвенных контуров, возможность применения ГИС-технологий при 3Dвизуализации георадарных данных, использование математических и статистических методов оценки варьирования идентификационных георадарных показателей свойств почв и установление

связей их с урожайностью сельскохозяйственных культур (Дмитриев и др., 1974; Любушкин, 2007).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Критерии идентификации гранулометрического состава грунтов и их влажности. Глубина проникновения электромагнитных волн определяется электрическим сопротивлением и диэлектрической проницаемостью грунта. Для определения истинной глубины залегания границ раздела сред и объектов необходимо знать скорость распространения волны в соответствующей среде. Влажность и содержание минеральных солей ухудшают условия распространения электромагнитных волн и снижают максимальную глубину зондирования. Диэлектрическая проницаемость грунтов находится в тесной функциональной связи с влажностью и гранулометрическим составом пород (Денисов и др., 2010). Обобщение этих данных позволило составить номограмму изменения скоростей электромагнитного импульса для различных категорий влажности грунтов разного гранулометрического состава (рис. 1).



**Рис. 1.** Изменение скорости импульса от диэлектрической проницаемости грунтов разного гранулометрического состава по категориям влажности (1 – максимальная гигроскопичность; 2 – наименьшая влагоемкость).

Расчетные показатели диэлектрической проницаемости грунтов и скоростей распространения импульса в подземной среде являются критериями идентификации грунтов по гранулометрическому составу и влажности. Визуализация этих зависимостей на радарограммах сопровождается появлением характерных рисунков (рис. 2).

Электромагнитное профилирование и выделение локальных объектов искусственного происхождения. Георадар позволяет обнаруживать методами импульсной радиолокации объекты по значениям проницаемости и проводимости. Этими свойствами обладают почти все объекты искусственного происхождения в грунте: погребенные подземные сооружения (фундаменты, подвалы, ходы, захоронения), отдельные предметы, размеры которых превышают 5–10 см.

Результаты зондирования выводятся на экране прибора в виде профиля отражения от границ раздела сред в зависимости от времени задержки прихода сигнала. Профиль состоит из отдельных кадров отражений полученных в каждой точке измерений. Время пробега электромагнитной волны зависит от глубины залегания отражающей поверхности и скорости распространения волны в грунте.

В качестве примера можно привести материалы георадарного профилирования территории косимой степи Центрально-Черноземного государственного природного биосферного заповедника им. В.В. Алехина, Курская область.



Пески Суглинки Глины **Рис. 2.** Стандартный рисунок визуализации параметров отраженных импульсов, характерный для грунтов разного гранулометрического состава.



**Рис. 3**. Поверхность локального объекта на территории косимой степи биосферного заповедника им. В.В. Алехина (Курская область), выделенного по осям синфазности георадарного профилирования.

На нескольких радарограммах на различной глубине четко выделяются оси синфазности (рис. 3). Соединение точек этих осей позволило выделить поверхность локального объекта размерностью  $100 \times 20$  м, находящегося на глубине от 2 до 5 м.

Анализ отраженных импульсов волновых функций по трассам георадарного профилирования. Основная информация о среде заключена в амплитуде отраженного импульса, его полярности, времени задержки и ширине осцилляций. Реальная радарограмма в общем случае состоит из суперпозиции многих отраженных знакопеременных сигналов, которые могут накладываться друг на друга. Максимальные значения амплитуды отраженных сигналов, имеющие локальный характер распределения на временной оси радарограммы, являются критериями идентификации выделения границ почвенных горизонтов. Простой однородный слой имеет периодическую последовательность пиков в амплитудном спектре суммарного отражения от кровли до подошвы этого пласта. Границы горизонтов проведены по локальным амплитудным максимумам на временном отрезке радарограммы (табл. 1).

Однако при знакопеременной функции по этому алгоритму трудно отличить сигнал, отраженный новым слоем, от "хвоста" предыдущего сигнала. Необходим некоторый инвариантный по

**Таблица 1.** Примеры идентификации почв, где в качестве критерия выступают данные локальных амплитудных максимумов отраженного сигнала по георадарному профилю



отношению к различным функциям импульса способ обнаружения отраженных сигналов (Резников и др., 2000; Копейкин, 2012). Такой способ предусматривает учет поведения электромагнитной волны при затухании в однородной среде, которое может протекать плавно или неравномерно. Кроме того, затухающий сигнал, в соответствии с законами электродинамики, при отражении от границ меняет свою полярность, если волна переходит из среды с меньшей диэлектрической проницаемостью или проводимостью, в среду с большими значениями этих параметров, и не меняет полярности в противоположном случае. Отраженный от размытой границы сигнал "растягивается" по времени. Слабая проводимость приводит только к "затуханию" сигналов, в то время как сильная – к их дисперсионному искажению (Копейкин, 2012).

На практике оказалось, что изменение полярности сигнала имеет широкое распространение на пашне, сенокосах и нарушенных землях сельскохозяйственного назначения. Появление пятнистости чередования трасс георадарного профилирования с различной полярностью отмечается на территориях с развитой комплексностью почвенного покрова (солонцовых участках в Волгоградской области). Там же при георадиолокационной съемке балок и оврагов отмечалась смена поляризации сигнала их южных, смытых склонов.

Длительность затухания определяется мощностью передатчика и физическими свойствами среды. Энергетический потенциал георадара "Лоза-В" – 128 дБ, излучаемая мощность – 50 мВт. Глубина зондирования в зависимости от гранулометрического состава грунта может колебаться от единиц до десятков метров (для влажных глинистых грунтов 3–7 м).

Учет и оценка этих особенностей поведения электромагнитного импульса при почвенных исследованиях обусловили применение в качестве идентификационного метода статистическую обработку значений амплитуды сигнала длительностью 512 нс. В качестве критерия идентификации почв используется среднее значение амплитуды импульса. Предусмотрена возможность оценки вариаций этого параметра, его дисперсии. По нашим данным, вариация амплитуды отраженных импульсов по трассам профилирования может достигать 40–90%.

Наибольшие значения коэффициентов вариации амплитуды приурочены к зоне смешанных и широколиственных лесов с распространением дерново-подзолистых и серых лесных почв, а также к сухостепной зоне с распространением каштановых почв (табл. 2).

Прослеживается определенная закономерность в изменениях средних значений амплитуды отраженного импульса по зональному признаку и по видам использования сельскохозяйственных угодий. Пахотные почвы характеризуются повышенными среднеарифметическими значениями амплитуды по сравнению с целинными землями и участками с искусственными лесонасаждениями.

115

Почвы, угодье,	Число	Среднее	Стан-	Ошибка	Коэффи-
местоположение	трасс,	значение	дартное	среднего,	циент
	$n^*$	амплиту-	отклоне-	т	вариа-
		ды, $\overline{x}$	ние, <i>s</i>		ции, v, %
Каштановые, цели-	5	128	118	5	93
на, Волгоградская					
область					
Черноземы южные,	5	149	58	3	39
пашня, Саратовская					
область					
Черноземы типич-	6	112	59	3	53
ные, некосимая					
степь, Курская об-					
ласть					
Черноземы типич-	6	120	65	3	54
ные, лесополоса,					
Курская область					
Черноземы типич-	9	132	60	3	46
ные, пашня, Курская					
область					
Черноземы обыкно-	6	111	66	3	60
венные, косимый					
участок, Воронеж-					
ская область	_				
Черноземы обыкно-	6	128	54	2	42
венные, пашня, Во-					
ронежская область					<b>10</b>
Черноземы обыкно-	6	114	11	4	68
венные, лесополоса,					
Воронежская об-					
ласть	-	110	(2)	2	50
Серые лесные, паш-	5	119	62	3	52
ня, гульская оо-					
ласть	-	127	<b>C1</b>	2	15
Дерново-	5	157	01	3	45
подзолистые, паш-					
ня, ілосковская оо-					
ласть					

Таблица 2. Статистическая обработка амплитуды отраженных сигналов по трассам георадарного профилирования различных угодий почв ЕЧР

\* В трассе 512 значений амплитуды.

Расчет средних значений амплитуды импульса по трассам георадарного профилирования не являются конечной процедурой методов идентификации почв. Существующая дифракция сигнала по профилю и появление шумов накладывают отпечаток на конечный результат. Учет этих характеристик сигнала при анализе вертикального и линейного изменения амплитуды отраженного импульса является основой верификации почв рассматриваемой территории в рамках используемого классификатора.

Аналитический метод идентификации почв по параметрам спектральной плотности отраженных сигналов трасс георадиолокационного профилирования территорий. Дифракция волн вызвана наличием неоднородностей в среде. Сигнал, попадая на такие неоднородности, рассеивается в разных направлениях. В качестве неоднородностей обычно выступают щебень, гравий, галька, древесные корни и др. Часть энергии импульса в результате теряется. Визуализированная картина на экране прибора становится размытой, ячеистой. Происходит рост значений отраженных амплитуд сигнала, появляются разные частоты в спектре, соответственно увеличивается шум.

В противоположность этому процессу, уменьшение значений амплитуды и приближение их к гармоническим колебаниям приводит к упрощению системы и увеличению ее организованности.

Такая оценка становится возможной при применении спектрального анализа, который позволяет разложить любой электромагнитный сигнал, создаваемый источником, на более простые составляющие. Процесс разложения сложного апериодического и периодического сигналов на простые гармонические составляющие называется анализом Фурье. Среди атрибутов спектрального преобразования выделяется параметр спектральной плотности сигнала (spectral dencity), т.е. его распределение в частотной области, состоящей из многих близких частот, которые вносят наибольший вклад в периодическое поведение всего ряда. Чтобы убрать случайные колебания, периодограмму сглаживают, например, методом взвешенного скользящего среднего.

Ниже приведены примеры преобразования Фурье отраженных импульсов по некоторым объектам с распространением черноземов (рис. 4). Расчеты проведены в программе Statistica.



**Рис. 4.** Графики изменения спектральной плотности амплитуды отраженных сигналов по трассам георадарного профилирования черноземов различных сельскохозяйственных угодий.

График распределения спектральной плотности по объектам различен. Выделяются объекты лесополос, где данные по средней плотности сигнала не только в 1.5 раза превышают аналогичные данные на целинных участках, но и при визуализации имеют характерный рассеянный рисунок.



**Рис. 5.** Изменение средних значений спектральной плотности отраженных импульсов по трассам георадарного профилирования черноземов (1 – обыкновенных, Воронежской области; 2 – типичных Курской области) по видам угодий.

Статистическая обработка выявила возможность использования показателя спектральной плотности в качестве критерия при идентификации почв (рис. 5).

Построены линейные регрессии, где в качестве факториальных признаков используются данные спектрального плотности импульса, а в качестве результативных признаков приняты параметры почвенных показателей. Кроме того, используются расчеты центральной частоты, ширины спектра, долей плотности, приуроченной к определенной частоте и др.

В качестве критерия идентификации выступают относительные параметры спектральной плотности отраженного импульса, выраженные через отношение их значений на отдельной трассе к максимальным значением, встречающимся в данном георадарном профиле.

Такие параметры применяются в качестве поправочных коэффициентов к реальным или расчетным значениям амплитуды для нивелирования эффекта дифракции импульса. Поправочные коэффициенты изменяются в пределах 0.1–1.0.

Аппроксимация значений амплитуды отраженного сигнала методом полиномиальных функций. Предложенный метод интерпретации данных является одним из способов статистической идентификации почвенных структур при георадарном профилировании в одной точке (трассе). Использование этого метода обусловлено его высокой эффективностью при идентификации динамических объектов в условиях сильной зашумленности сигнала, какими являются почвы.

Метод полиномиальных функций предусматривает расчет тренда изменений амплитуды. Тренд, или тенденция f(t), представляет собой вероятностную устойчивую закономерность, наблюдаемую в течение определенного периода времени. При георадарном профилировании общая длительность сигнала составляет 512 нс. Обычно тренд (тенденция) описывается с помощью той или иной функции f(t), как правило, монотонной аргументом которой является время. Тренды могут быть описаны различными уравнениями: линейными, логарифмическими, степенными и т.д. В нашем случае рассматриваются полиномиальные функции первого и второго порядков.

Фактический тип тренда устанавливают на основе подбора его функциональной модели статистическими методами либо сглаживанием исходного временного ряда. Сглаживание временного ряда, т.е. замена фактических данных расчетными значениями, имеющими меньшую колеблемость, чем исходные данные, является простым методом выявления тенденции развития. Соответствующее преобразование называется фильтрованием. Расчет проводится в программах: Крот, Excel, Statistica. При подстановке в модель (уравнение тренда) соответствующего значения фактора времени проводится точечный прогноз. Прогнозирование методом экстраполяции базируется на предположениях затухания амплитуды импульса, описывающегося плавной кривой, и учета случай-

ности, которая позволяет оценить вероятность отклонения от закономерного развития.

Выделяют нисходящие и восходящие типы трендов, которые отражают изменение полярности амплитуды отраженных импульсов в подповерхностной среде отдельных георадиолокационных трасс. Среди причин появления смены фаз сигнала при прохождении трассы выделяются электродинамические законы прохождения зондирующих импульсов в неоднородной среде, а также усложнения системы за счет появления или удаления нового рассеивающего слоя (снега, торфа, органических, делювиальных, пролювиальных и аллювиальных наносов).

Обычно в георадарном профиле отмечаются тренды одной полярности сигнала, но могут встречаться профили с чередованием разнознаковых трендов. Например, георадарный профиль балки в зоне распространения каштановых почв Волгоградской области. На южном склоне балки гумусовый горизонт смыт. На поверхность выходят карбонатные легкоглинистые отложения. Нижняя часть склона и днище балки заполнены делювиальными отложениями. Эта часть балки отмыта от солей. Не вскипает. Скопления гипса отмечаются на глубине более 3 м от поверхности склонов разной экспозиции. Исходные данные георадарного профилирования отфильтрованы, рассчитаны тренды изменения амплитуды по полиномам второй степени для 11-ти трасс. Пять из них, имеющие восходящий вид тренда, преобразованы в нисходящий. Введены поправочные коэффициенты на дифракцию сигнала рассматриваемой толщи через отношение средних значений спектральной плотности сигнала каждой трассы к максимальным их параметрам на данном профиле (табл. 3). Поправочные коэффициенты изменяются в пределах 1.0-0.4.

Верификация новых расчетных значений амплитуды с поправкой на дифракцию сигнала показала высокую корреляцию их изменения с элементами рельефа балки и экспозицией ее склонов, обусловленных различием в увлажнении и наличием или смытостью верхних горизонтов. Резко выделяется днище балки с наименьшими параметрами амплитуды импульса.

Несмотря на всю привлекательность спектрального преобразования Фурье и расчета трендовых моделей, они могут служить лишь вспомогательными операциями при установлении почвен-

Таблица 3. Расчетные значения амплитуды импульса методом аппроксимации полиномиальных функций по трассам георадарного профилирования балки в зоне распространения каштановых почв в Волгоградской области

Bpe-	Расстояние между трассами, м											
мя, пс	0		30		50		70		80		100	
	у	0.86y*	у	0.40y	у	0.66y	у	1.00y	у	0.82y	у	0.88y
1	129	111	164	66	158	104	92	92	150	123	102	90
40	115	99	149	60	132	87	118	118	120	98	107	94
80	100	86	132	53	115	76	131	131	95	78	105	92
120	86	74	118	47	100	66	136	136	75	62	96	84
160	72	62	102	41	95	63	130	130	60	49	84	74
200	60	52	90	36	95	63	112	112	50	41	65	57
240	45	39	78	31	100	66	85	85	45	37	40	35
256	40	34	72	29	104	69	72	72	42	34	30	26

\* С поправочным коэффициентом на дифракцию отраженного импульса.

ных горизонтов. Проверка их тождественности шаблону осуществляется по полевым данным буровых скважин и почвенных разрезов.

Визуализация трендовых расчетных показателей амплитуды в двухмерном измерении георадарного профиля балки с использованием поправочного коэффициента на спектральную плотность показала высокую сходимость выделенных слоев в подповерхностной толще с реальными.

Результатом обработки данных георадарного зондирования, полученных на стадии полевого профилирования на изучаемом участке, является база данных, включающая в себя информацию о прохождении отраженного сигнала по каждому метру реального подповерхностного пространства в точках стояния антенны.

Для визуализации ее в программе Voxler по координатам строится модель с окраской значений амплитуд. Программа позволяет представить данные в плоскости и 3D-измерении.

Трехмерное изображение данных зондирования представляет собой объемную модель реального изучаемого объекта. Традиционными методами получить такую форму модели тестового полигона практически невозможно из-за больших затрат средств, труда и времени. Плановые срезы на различных глубинах данной

модели представляют собой поверхности площадной неоднородности литологического строения почвенного покрова.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Каждый из выделенных почвенных горизонтов представляет собой простой однородный слой, имеющий специфическую периодическую последовательность пиков в затухающем амплитудном спектре суммарного отражения импульса от кровли до подошвы этого пласта. Изменчивость его мощности рассчитываются через амплитудные максимумы этого горизонта. Максимальные значения амплитуды отраженных сигналов, имеющие локальный характер распределения на временной оси радарограммы, являются критериями идентификации выделения границ почвенных горизонтов.

Преобразование временной развертки трассы в глубинную осуществляется расчетом скорости распространения электромагнитных волн по слоям на частоте зондирования. Обобщение данных по диэлектрической проницаемости грунтов, их функциональных связей с влажностью и гранулометрическим составом пород позволило составить номограмму изменения скоростей электромагнитного импульса для различных категорий влажности грунтов. Расчетные показатели диэлектрической проницаемости грунтов и скоростей распространения импульса в подземной среде являются критериями идентификации грунтов по гранулометрическому составу и влажности.

Учет и оценка поведения электромагнитного импульса в подповерхностной среде обусловили применение в качестве верификационного метода статистическую обработку значений амплитуды сигнала. В качестве критерия идентификации почв используется среднее значение амплитуды импульса. Предусмотрена возможность оценки вариаций этого параметра, его дисперсии.

Для оценки дифракции электромагнитных волн в изучаемой среде, вызванной наличием неоднородностей, приводящих к увеличению шума и соответственно размыву границ, выделяемых на радарограммах почвенных горизонтов, применяется статистический метод спектрального преобразования данных амплитуды отраженного импульса по всей глубине его длительности. Статистическая обработка позволяет использовать спектральную плотность в качестве критерия идентификации выделения границ почвенных горизонтов, через расчет поправочных коэффициентов на дифракцию сигнала.

Условия почвообразования и характер использования почв налагают существенный отпечаток на вероятность изменения вектора направленности амплитуды отраженных импульсов по отдельным трассам георадарного профилирования почвенного покрова территорий. Расчет полиноминальных трендовых моделей этих показателей позволяют сравнивать результаты измерений между собой, проводить прогностические заключения о поведении данных почвенных структур в будущем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белобров В.П., Айдиев А.Я., Воронин А.Я., Куленкамп А.Ю. Оценка неоднородности почвенного покрова при полевом опыте по минимизации обработок // Агроэкологические проблемы почвоведения и земледелия. Курск, 2013. С. 14–18.

2. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Интерпретация данных георадиолокационных наблюдений // Разведка и охрана недр. 2001. № 3. С. 11–14.

3. Воронин А.Я., Пягай Э.Т., Белобров В.П., Айдиев А.Я., Куленкамп А.Ю. Георадарный метод изучения почвенного покрова (на примере типичных черноземов) // Агроэкологические проблемы почвоведения и земледелия. Курск, 2013. С. 33–38.

4. Денисов Р.Р., Капустин В.В. Обработка георадарных данных в автоматическом режиме // Геофизика. 2010. № 4. С. 76–80.

5. Дмитриев Е.А., Самсонова В.П., Рожков В.А. Об использовании теории случайных функций при изучении почвенного покрова // Вестник Моск. ун-та. Сер. Биология, почвоведение. 1974. № 3. С. 43–53.

6. Золотая Л.А., Калищева М.В., Хмелевской В.К. Возможности геофизических методов при изучении состава и структуры почвенного покрова // Разведка и охрана недр. 2004. № 5. С.47–50

7. *Калинкевич А.А., Крылова М.С., Масюк В.М, Марчук В.Н.* Использование георадара для исследования неоднородностей верхнего слоя почвы хвойного леса // Радиотехника. 2009. № 3.

8. Калинкевич А.А., Кутуза Б.Г., Крылова М.С. и др. Об опыте использования георадарных данных для интерпретации РЛИ, получаемых с помощью ИМАРК // Тр. 2-й Междунар. конф. "Акустооптичекие и радиолокационные методы измерений и обработки информации". Суздаль, 2007. С. 9–16.

9. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.

10. Копейкин, В.В. Распространение электромагнитных импульсов в подземной среде: (электронный документ). (http://www.geo-radar.ru/articles/articles.php). 2012.

11. Любушкин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.

12. Методические рекомендации по применению георадаров при обследовании дорожных конструкций. Министерство транспорта Российской Федерации. М.: Росавтодор, 2003.

13. Подповерхностное зондирование с помощью геофизического комплекса "ЛОЗА", "ЛОЗА-М" (поиск протяженных подземных сооружений) (методические рекомендации). М.: ВНИИЛМИ, 2012. 16 с.

14. Пягай Э.Т., Белобров В.П., Молчанов Э.Н., Сео Мунг Чул, Сон Йон Куи. Использование георадара в почвенных исследованиях // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2009. Вып. 64. С. 34–40.

15. Пягай Э.Т., Ильин Л.И., Морозов П.А. Мониторинг и прогноз агроэкологического состояния земель. М., 2013. 297 с.

16. Резников А.Е., Копейкин В.В., Морозов П.А., Щекотов А.Ю. Разработка аппаратуры, методов обработки данных для электромагнитного подповерхностного зондирования и опыт их применения // Успехи физических наук. 2000. № 5. С. 565-568.

17. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. М., 2008. 192 с.

18. Янковский К.П. Оценка диагностических возможностей систем георадарного зондирования природных и природно-антропогенных объектов. Автореф. ... дис. ... канд. тех. наук. М., 2005.

19. *Fisher M*. Ground-penetrating radar used to uncover misteries beneath our feet // Soil Horizons. 2013. Vol. 54. No. 6. P. 54.

# CRITERIA FOR IDENTIFICATION OF THE FORM AND FUNCTIONAL PROPERTIES OF THE SOIL PROFILE IN GEORADIOLOCATED STUDIES BY USING GEORADAR "LOZA-B"

## A. Ya. Voronin

V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, 119017 Russia, Moscow, Pyzhevskii 7, bld. 2 e-mail: avoron46@gmail.com

The valuable criteria for identification of the soil profile form and its some functional properties are considered as determined by interpretation of radarograms in the course of georadiolocated profiling of different territories using the geophysical device "Loza-B". Apart from a standard set

of procedures for digital processing of radarograms and constructing a temporary profile of changes in the reflected impulse amplitude along the direction of its sounding and transformation with depth, it is suggested to use the information on changing the dynamic characteristics of the wave field in homogenous media. This information involves the data about splash of the wave field, determination of diffraction points (synphasic axes) corresponding to horizons and objects under study, calculation of the frequency characteristics for distribution of reflected signals in the soil profile. A simple homogenous layer has a periodical sequence of picks in the amplitude spectrum within the depth of this layer. Changes in the thickness of the soil horizon are calculated by analyzing the local values of amplitude maximum of reflected impulses in the radarogram. The procedure of soil verification based upon the comparison of real soil profiles with standard ones within the framework of a definite classifier is conducted by statistic methods for calculating the polynomial functions of trend values of the signal amplitude according to its duration. The statistical processing includes calculation of average values, standard deviations and the distribution frequency of signal amplitude connected with the layer thickness and the amount of signal oscillations. The indices of Furie's spectral transformation (frequency, period, spectral density) along with trend characteristics of polynomial modulations are considered as the major criteria for the two-staged identification of soils. In spite of attractive pattern of Furie's spectral transformation the calculation of trend models should be testified by data obtained for soil profiles in field.

*Keywords:* amplitude of reflected impulse, georadar, identification, soil, radarogram, spectral density, trend.