

Агрочововедение и агроэкология

УДК 631.437.226.2

DOI: 10.31857/S2500262722040068, EDN: GDRBIE

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОБЛИК ПОЧВ КАК ОСНОВА ИХ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА***А.Я. Воронин¹**, кандидат сельскохозяйственных наук, **И.Ю. Савин^{1,2}**, академик РАН¹Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт им. В.В. Докучаева»,
117019, Москва, Пыжевский пер., 7, стр.2
E-mail: savin_iyu@esoil.ru²Российский университет дружбы народов,
117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

Поиск интегрального показателя плодородия почв – важная задача, решение которой позволит создать более точные методы мониторинга почв, а также сократить время полевых работ и затраты на лабораторные анализы почвенных образцов. Предложено в качестве такого интегрального показателя использовать диэлектрический облик почв. Решение этой задачи основано на использовании статистического метода спектрального преобразования бинарных данных амплитуды отраженного электромагнитного импульса по всей глубине его длительности в почвенной толще. Работу проводили на примере трех почв пахотных и залежных земельных участков ВНИИМЗ (Тверская область). Среди атрибутов спектрального преобразования использовали параметр спектральной плотности георадарного сигнала, его распределение в частотной области, состоящей из многих близких частот, которые вносят наибольший вклад в периодическое поведение импульса в подповерхностной почвенной среде. Георадарное профилирование проводили в течении 2021 г. ежемесячно. Изменчивость мощности горизонтов и слоев рассчитывали через модули амплитудных максимумов с учетом проводимости горизонта (диэлектрическая проницаемость и скорость прохождения сигнала в этой среде). Предложено представлять диэлектрический облик почвы в виде абстрактных моделей-матрешек. Своеобразие матрешки в ее внутренней структуре, основанной на подобии: каждая последующая вложенная фигурка подобна внешней по форме, свойству открываться (за исключением последней неразборной, представляющей каркас георадарного облика почвы), отличия лишь в размере. В диэлектрическом облике почвы выделяется его коровая (квазиинвариантная) часть, а также динамичная часть, меняющаяся в различных по времени циклах. Создание модели облика почвенных тел и ее наглядное представление открывает новые возможности для комплексной оценки состояния почв и оперативного и низкочастотного мониторинга их плодородия.

DIELECTRIC VISION OF SOILS AS A BASIS OF ITS AGROECOLOGICAL MONITORING**A.Ya. Voronin¹, I.Yu. Savin^{1,2},**¹V.V. Dokuchaev Soil Science Institute,
117019, Moscow, Pyzhevskii per., 7, str.2
E-mail: savin_iyu@esoil.ru²Institute of Environmental Engineering, RUDN University,
117198, Moscow, ul. Miklukho-Maklaya, 6

The search for an integral indicator of soil fertility is an important task, the solution of which will allow to create more accurate methods of soil monitoring, reduce time of field works, and cost of soil samples analysis. It was proposed to use dielectric vision of soils as such an integral indicator. The solution of this problem was based on the application of a statistical method of spectral transformation of binary data of the amplitude of the reflected electromagnetic pulse along the entire depth of its duration in the soil strata. The research was carried out on the example of three soils of arable and fallow land plots of VNIIMZ (Tver region). Among the attributes of spectral transformation we used the parameter of spectral density of GPR signal, its distribution in the frequency domain consisting of many close frequencies that make the greatest contribution to periodic pulse behavior in the subsurface of soils. GPR profiling was carried out during 2021 on a monthly basis. Variability of horizons and layers thickness was calculated through modules of amplitude maxima taking into account conductivity of horizon (dielectric permittivity and signal transmission rate in this medium). It was proposed to represent the dielectric vision of soil in the form of abstract matryoshka models. The peculiarity of matryoshka is in its internal structure based on similarity: each next inserted figure is similar to the external one in vision and opening property (except for the last non-dismountable one, which represents the frame of the dielectric soil image), the only difference is in size. The dielectric vision of the soil is distinguished by its core (quasi-invariant) part, as well as the dynamic part changing in different time cycles. The creation of the model of soil bodies' appearance and its visual representation opens up new possibilities for the integrated assessment of soil status and for the operative and low-cost monitoring of their fertility.

Ключевые слова: георадар, почва, мониторинг, динамика свойств почв**Key words:** ground penetrating radar, soil, monitoring, soil properties dynamics

Почва, как и любой природный объект, – сложное и многогранное образование. Поэтому основная ее функция – плодородие определяется многими конкретными свойствами почв. При оценке и мониторинге уровня плодородия почв часто анализируют несколько десятков их конкретных свойств [1]. Наиболее часто используют

методы морфологического и микроморфологического описания, изучения химического состояния почвы, ее физических (оструктуренность, плотность, пористость и др.), биологических, минералогических и гидрологических свойств. Все эти методы позволяют вскрывать по отдельности состояние плодородия почвы с точки

*исследование выполнено при финансовой поддержке Российской Федерации (соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2020-909 от 16 ноября 2020 г.).

зрения ее отдельных свойств, а также получать представление о состоянии плодородия почв с учетом всех перечисленных свойств.

При становлении агропочвоведения как науки максимальное влияние уделяли использованию для оценки плодородия почв их морфологическим и химическим свойствам [2]. Позднее в анализ включались и постепенно детализировались методы изучения и других свойств почвы, которые ранее не принимали во внимание из-за отсутствия знаний и/или технических возможностей изучения. Так, изучение метагенома почв как индикатора их актуального плодородия и здоровья стало возможным только в последние десятилетия [3], как и изучение химических и других свойств почв на молекулярном и наноуровне [4].

На сегодняшний день стало очевидным, что оценить комплексно плодородие почвы невозможно без учета ее магнитных и электрических свойств. Научные публикации последних лет показывают, что вещественный и химический состав почвы, другие свойства, определяющие ее плодородие, тесно связаны с магнитными и электрическими свойствами, с диэлектрической проницаемостью почв [5, 6]. Поэтому теоретически отклик почвы на электромагнитные воздействия может рассматривать как некий комплексный, интегральный показатель ее состояния. Однако этот вопрос до сих пор остается недостаточно изученным.

Один из подходов к оценке электрических и магнитных свойств почв предусматривает использование метода георадарного профилирования, основанного на анализе волновой картины радарограммы и прослеживании выбранных по тем или иным критериям осей синфазности отражённых сигналов, которые соответствуют границам раздела слоёв с различными электрофизическими параметрами. Принцип действия георадара базируется на зондировании земной поверхности электромагнитными волнами фиксированной длины. В зонах перепадов диэлектрической проницаемости грунта формируется отраженный сигнал, который и фиксирует георадар. По времени прихода отраженного сигнала судят о глубине границы раздела грунтов с разной диэлектрической проницаемостью [7]. От длины волны зависит глубина зондирования. Для целей исследования почв ее обычно подбирают таким образом, чтобы зондирование осуществлялось на 2...6 м. Для расшифровки и обработки данных георадарного зондирования разработаны специальные подходы, создано специализированное программное обеспечение [8, 9].

Известно, что практически все свойства почв связаны между собой и находятся под взаимным влиянием [10]. Так, содержание влаги в почвах связано с гранулометрическим составом, от содержания гумуса зависит химический состав почвы и ее физические свойства. Это открывает широкие возможности для косвенного детектирования с использованием георадара свойств почвы, которые напрямую не связаны с диэлектрической проницаемостью, например, цвета [11]. Кроме того, они открывают новые возможности для комплексной оценки состояния почв и его оперативного и низкокзатратного мониторинга.

Цель исследования – теоретическое обоснование понятия «диэлектрический облик почвы» и демонстрация возможности его использования для оперативного мониторинга плодородия и агроэкологической оценки почв.

Методика. Существуют свойства почв, которые определяют их диэлектрическую проницаемость. Часть из них относительно постоянна во времени, а часть динамична под воздействием разных факторов

(использование почв, метеоусловия, изменение уровня грунтовых вод и др.).

Анализ научных публикаций позволяет выделить группы свойств почв, которые определяют их плодородие и одновременно оказывают существенное влияние на диэлектрические свойства [12, 13]. Показана связь результатов георадарного профилирования с такими свойствами как гранулометрический состав [14, 15, 16], влажность [17], мощность торфяных и гумусовых горизонтов [18], а также с другими свойствами почв [19].

Судя по этим публикациям, постоянную (коровую) часть георадарного профиля (диэлектрического облика) почв определяют такие свойства (и их варьирование по профилю), как гранулометрический состав; плотность сложения; пористость; почвенная структура; набухание; включения; содержание органического вещества; наличие торфа; присутствие вечной мерзлоты. Они образуют некий квазипостоянный каркас диэлектрического облика почвы. Причем большая часть этих свойств может меняться со временем, что будет сопровождаться изменением каркаса. Например, может постепенно меняться содержание органического вещества в почве, деградировать вечная мерзлота или торфяные горизонты, изменяться структура, плотность и пористость почв. Но скорости подобных изменений в естественных условиях обычно невелики.

Изменчивость георадарного профиля почв в сезонном и более коротких циклах определяют такие свойства (и их варьирование по профилю), как влажность; состав и концентрация почвенного раствора; новообразования; уровень грунтовых вод; теплообеспеченность.

Таким образом, профильное распределение постоянных свойств определяет квазипостоянный каркас диэлектрического облика конкретной почвы, а перечисленные динамические свойства будут его изменять в течение сезона или даже суток (например, при выпадении дождя).

Следовательно, абстрактно модель динамичности диэлектрического облика почв можно представить в виде стержня вращения (рис. 1). Подобное формализованное представление диэлектрического облика почвы базируется на использовании теории симметрии [20]. При этом светло-серым цветом показана коровая область

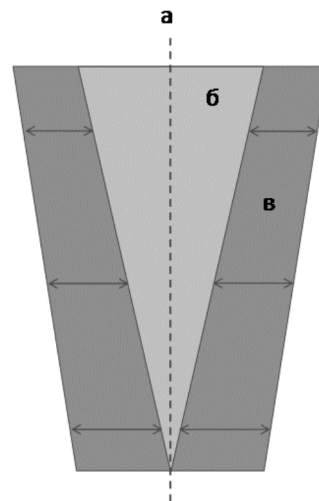


Рис. 1. Абстрактная модель диэлектрического облика почв и его динамичности: а – ось симметрии (стержень профилирования), б – коровая часть диэлектрического облика, в – динамичная часть диэлектрического облика.

диэлектрического облика почвы (б). Она представлена в виде симметричной относительно оси, а фигуры светлого цвета – точки (точнее стержня) георадарного профилирования, считая, что свойства почвы от стержня изменяются по осям X и Y одинаково во все стороны в пределах некоей окрестности. Форма фигуры (изменение диэлектрической проницаемости) по оси Z (по глубине) предопределяется варьированием по этой оси квазипостоянных свойств почв.

Темно-серым цветом (в) на рисунке показана в абстрактном виде динамичная часть диэлектрического облика почвы. То есть, это зона потенциальной изменчивости диэлектрического облика из-за изменений динамичных свойств почв во времени.

Коричневая часть диэлектрического облика в сочетании с динамичной может также служить основой для выделения горизонтов почв, которые однородны по свойствам, предопределяющим ее диэлектрическую проницаемость и динамичность во времени. Известно, что при моделировании исследуют не сам объект, а промежуточный вспомогательный, находящийся в некотором объективном соответствии с познаваемым объектом и отражающий в формализованном виде сведения о нем.

Приемы анализа и аппарат решения при этом различны, но метод одинаково требует установления критериев подобия, то есть словесной или математической формулировки тех условий, при которых модель может считаться закономерно отражающей оригинал.

Диэлектрический облик почв может быть формализован симметричной фигурой, представляющей рекурсивное обтягивание коровой части георадарного облика почвенной массы ее динамичной оболочкой, задаваемой параметрами спектральной плотности георадарного импульса (кукла). Например, при мониторинге влажности почвы, каждая информационная единица (минимум, максимум, средняя) может быть включена в состав другой, тогда кукла превращается в матрешку. Принцип матрешки (принцип концентрирующей интеграции) широко используют в дизайне, архитектуре, науке [21], и в нашем случае он точно отражает суть наблюдаемых процессов и диэлектрического облика почвы в целом с учетом его динамичности.

Подобие – объективное свойство материи, которое проявляется с вероятностной стохастичностью с отношениями между телами и с конечной геометричностью при структурном взаимоотношении.

Объектами нашего исследования были пахотные и залежные земли ВНИИМЗ, расположенного в Тверской области.

На рассматриваемой территории преобладают сглаженные увалистые моренные и морено-зандровые равнины. Регион сильно освоен и преобразован в результате хозяйственной деятельности человека. Поверхность рассматриваемой территории поднимается до 160 м абсолютной отметки. На водораздельных участках местами отмечаются замкнутые повышения, представляющие собой реликты древнего рельефа.

Моренные суглинки слоем неравномерной мощности залегают на водораздельных участках. Перекрыты они слабокаменистыми флювиогляциальными песками и супесями, на поверхности которых сформировался современный почвенный покров. Литологическая неоднородность пород привела к формированию переувлажнения.

На участке преобладают агродерново-подзолисто-глеевые слабокаменистые супесчаные, в сочетании с дерново-подзолистыми глеевыми супесчаного и легкосуглинистого гранулометрического состава почвами,

развитыми на песчано-суглинистых флювиогляциальных и карбонатных моренных отложениях легкосуглинистого состава. В пойме р. Волги на аллювиальных серогумусовых глеевых легкосуглинистых почвах, подстилаемых аллювиальными слоистыми отложениями, заложен вертикальный георадарный профиль (т.Э1) [22].

Всего для мониторинга было отобрано 3 точки с данными вертикального георадарного профилирования (Э1, Э2, Э3). Географические координаты точек георадиолокационного профилирования определяли в поле прибором Garmin GPSmap 76CS: для Э1 – это 56° 47' 14.96"С 36° 7' 30.37"В; Э2 – 56° 46' 25.82"С 36° 5' 32.82"В; Э3 – 56° 46' 38.55"С 36° 5' 48.68"В. Профилирование проводили георадаром «Лоза-В» с частотой 100 МГц. Всего в каждой точке выполняли по 10 измерений (кадров). Работу проводили в 2021 г. в каждой точке в течение всего года ежемесячно. В каждой точке буром отбирали образцы почвы по всему профилю (до 120...150 см) с шагом в 10 см одновременно с проведением георадарного профилирования. Моделирование поверхности полученных показателей осуществляли методом обратных расстояний второго порядка в программе Voxler 3.

Анализ, обработку георадарного разреза и подготовку отчетного представления осуществляли в специализированной программе «КРОТ» [7].

Решение задачи предварительной обработки георадарных данных в нашем случае основано на применении статистического метода спектрального преобразования бинарных данных амплитуды отраженного импульса по всей глубине его длительности. Неоднородность выявляется путем сопоставления множества кадров изменения спектральной плотности амплитуды отраженных импульсов в подповерхностной среде георадиолокационных профилей установлением мер сходства (близости межкласстерного расстояния) и связей между ними.

Сигнал с определенной частотой можно связать в спектре гармоник с реальными процессами, имеющими циклический характер и вносящими значительный вклад в форму сигнала.

Режим цифровой фильтрации в программе «КРОТ» реализован в двух опциях: вертикальной и горизонтальной одномерной фильтрации. Для того чтобы убрать случайные колебания, периодограммы предварительно сглаживали методом взвешенного скользящего среднего с использованием расстояния Хемминга, которое принимали равным 10.

Полученные первичные данные георадарного профилирования подвергали преобразованию Фурье в программе Statistica, по результатам которого был рассчитан показатель спектральной плотности георадарного сигнала.

Статистическую обработку данных (расчет средних значений, стандартных отклонений, показателей вариативности распределения амплитуды отраженных сигналов единичных временных рядов и радарограмм) проводили с использованием Excel 2007 и Statistica.

Алгоритм первичной обработки отраженных амплитуд импульсов включал установку параметров георадарных профилей, цифровую фильтрацию данных (по стандартной процедуре прямоугольным фильтром (скользящее среднее)), вычисление средней скорости распространения волны в грунте.

Маску фильтра строили на основе одной или нескольких эмпирически установленных нами связей на исследуемых почвах между точкой матрицы диэлектрической проницаемости среды (ϵ) и одним динамическим свойством – показателем влажности почв (% от массы).

Интерпретацию результатов георадарного зондирования завершали преобразованием временного разреза радарограммы в глубинный.

Результаты и обсуждение. Радарограммы были пересчитаны в величины спектральной плотности амплитуды импульса по профилю почвы (см. табл.). Рассчитаны минимальные, средние и максимальные величины этого показателя за год. Согласно результатам проведенного исследования в профиле все трех почв выделяются сильно контрастные по спектральной плотности амплитуды георадарного импульса слои. Кроме того,

Статистические показатели изменения спектральной плотности амплитуды импульса по глубинам для всех трех точек профилирования за апрель -декабрь 2021 г.

H, см	n	X	M	SQ	V, %	min	max
точка Э1							
10	8	711,4	674,6	231,4	32,5	460,6	1190,0
20	8	911,7	854,6	403,0	44,2	485,7	1625,0
30	8	1749,8	1703,4	330,0	18,9	1317,3	2168,9
40	8	1806,8	1898,6	526,4	29,1	927,3	2549,9
50	8	3190,4	2902,8	1801,4	56,5	1300,0	6192,7
60	8	4887,2	5041,7	2261,3	46,3	921,4	8285,2
70	8	17812,3	13448,9	16917,4	95,0	961,3	52976,0
80	8	28929,1	19241,2	28275,9	97,7	1917,0	81620,2
90	8	15884,8	10250,8	18842,9	118,6	751,3	59643,1
100	8	6596,8	4307,9	7251,9	109,9	755,9	23519,3
110	8	3201,1	3375,9	1700,5	53,1	824,4	6189,8
120	8	2566,2	2693,7	933,5	36,4	1043,4	3830,1
130	8	2228,1	2151,2	559,8	25,1	1491,6	2900,0
140	8	2033,2	2028,0	454,2	22,3	1336,9	2700,0
150	8	1938,4	2072,1	637,1	32,9	1134,7	2758,9
точка Э2							
10	8	1097,0	925,2	685,5	62,5	202,0	2284,2
20	8	619,5	520,9	360,8	58,3	305,8	1468,1
30	8	867,9	801,4	283,3	32,6	535,3	1438,0
40	8	1305,4	963,5	817,3	62,6	804,4	3209,5
50	8	2492,3	2481,9	1291,5	51,8	1047,8	4359,4
60	8	7101,1	5214,7	5082,0	71,6	1281,5	14915,4
70	8	6319,5	6620,9	3356,7	53,1	1776,7	12143,9
80	8	5952,7	7772,9	3695,6	62,1	770,8	9769,9
90	8	9500,0	9660,1	7556,5	79,5	1203,6	20225,5
100	8	9951,1	7578,7	7996,1	80,4	567,4	22689,3
110	8	8244,0	2963,2	9738,8	118,1	620,8	27377,3
120	8	5379,3	3077,0	6241,5	116,0	827,1	19458,7
точка Э3							
10	8	1350,9	836,3	1510,1	111,8	397,9	5022,4
20	8	737,2	680,4	236,6	32,1	489,6	1212,6
30	8	1107,3	985,2	299,1	27,0	835,2	1578,8
40	8	1387,1	915,8	1564,6	112,8	328,7	5140,5
50	8	2386,5	1891,6	1683,8	70,6	667,8	4855,0
60	8	5466,7	5780,3	3549,1	64,9	498,7	11521,8
70	8	5729,5	4700,6	4218,6	73,6	385,5	12331,1
80	8	6871,7	5966,9	4778,2	69,5	352,6	12570,8
90	8	18873,9	21477,6	9133,4	48,4	395,4	30753,5
100	8	24437,5	23938,8	14136,6	57,8	526,1	43851,0
110	8	16084,0	13200,8	15640,2	97,2	671,1	49612,5
120	8	8171,6	5028,4	9954,7	121,8	836,7	30974,2
130	8	3450,1	1936,8	4021,9	116,6	560,9	12964,4
140	8	2068,7	1473,1	1476,1	71,4	516,8	4817,2
150	8	1571,5	1514,0	792,0	50,4	551,0	2948,7

она существенно изменяется в разные даты измерений в одной и той же точке. Причем динамика в каждой точке имеет свою специфику, что связано на территории исследований с особенностями строения профиля почв и варьированием влажности в различных слоях почв из-за влияния атмосферных осадков, снеготаяния и колебаний уровня грунтовых вод.

В точках Э1 и Э3 хорошо выделяется слой с повышенными значениями, а в почвах точки Э2 наблюдается чередование слоев с разной спектральной плотностью амплитуды импульса. Во всех точках минимальные и максимальные величины также различаются и находятся на разной глубине.

Все эти неоднородности отражают специфику строения каждого из проанализированных профилей почв. Минимальные значения на каждой из глубин при этом и образуют каркас (коровую часть) диэлектрического облика почв.

Рассматриваемые почвы трех разных участков подвергались воздействию как природных, так и техногенных процессов, которые способствовали трансформации их профилей. Литологическая неоднородность и, как следствие, изменение водного режима – один из основных факторов на территории исследований, которые предопределяют их диэлектрическую проницаемость.

Статистический анализ средних значений динамики влажности рассматриваемых почв показал, что на определенных глубинах почвенных профилей отмечается высокая вариабельность наличия влаги в разные сроки наблюдения. Так, в точке Э1 на аллювиально-луговых почвах коэффициент вариации влажности превышает 65 % на глубинах 80...100 см, на дерново-подзолистых супесчаных (точка Э2) высокие его величины (>60 %) отмечены практически на всех глубинах до 150 см. В точке Э3 на дерново-подзолистых глеевых почвах высокие коэффициенты вариации (около 60 %) наблюдали на глубинах 30 см и глубже 1 м. Для всех почв характерен промывной режим увлажнения.

Полученные данные о георадарном облике каждой из почв были представлены в виде моделей (матрешек). Внутренняя область каждой из представленных матрешек (рис. 2) соответствует каркасу диэлектрического облика почвы, его коровой части (то есть отражает минимально возможные для конкретной почвы значения диэлектрической проницаемости на каждой глубине). А внешняя часть характеризует потенциально возможный для каждой почвы максимальный сезонный размах величины георадарного показателя.

В соответствии с формой матрешки могут быть выделены почвенные слои с постоянными значениями спектральной плотности амплитуды импульса, а также слои почвы, переходные между ними. На рис. 2 подобные слои рассматриваемых почвенных профилей (коровая часть диэлектрического облика) показаны разными оттенками серого цвета.

Принцип матрешки позволяет более полно по смыслу и наглядно представить модель строения изучаемых почв, чем это можно сделать в виде обычных графиков. Как было отмечено ранее своеобразии матрешки в ее внутренней структуре, основанной на подобии: каждая последующая вложенная фигурка подобна внешней по форме, цвету, рисунку, свойству открываться (за исключением последней неразборной, представляющей каркас диэлектрического облика почвы), отличие лишь в размере. Также раскрывая каждую из матрешек, мы обнаруживаем новую, с новыми свойствами, постепенно доходя до конечной цели (коровой области диэлектрического облика почвы).

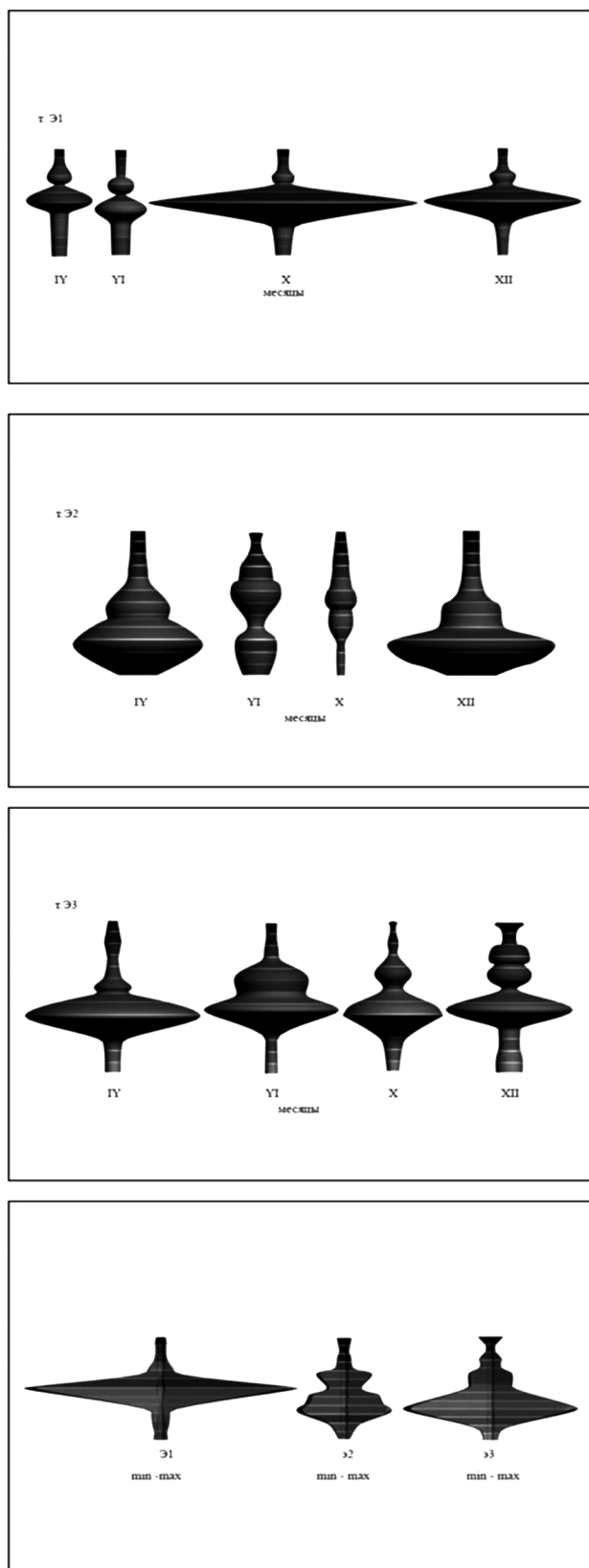


Рис. 2. Матрешки, отражающие целостность (всеобщность) изучаемых почв с точки зрения их диэлектрического облика.

Подобные слои могут точно соответствовать почвенно-генетическим горизонтам, но могут и не со-

ответствовать. Последнее происходит в случаях, когда соседние генетические горизонты почвы характеризуются схожей диэлектрической проницаемостью и на матрешке выглядят как один слой облика почвы, или когда почвенно-генетический горизонт характеризуется неоднородностью свойств, влияющих на диэлектрический облик почвы (например, слоистостью, или каменистостью, которые не выделяются при описании почвы в виде отдельных генетических горизонтов).

Необходимо отметить, что в реальности вряд ли можно точно измерить коровую часть георадарного облика почвы, так как для этого необходимо было бы полностью исключить влияние всех динамических свойств. Но полностью исключить влияние влажности почв при полевых измерениях невозможно (по-видимому, кроме экстрааридных условий). Таким образом, при измерениях в поле можно получить информацию о коровой части диэлектрического облика почвы лишь с неким приближением. Теоретически, ее можно рассчитать на основе моделирования связи данных георадарного профилирования с динамическими свойствами почв. Путем моделирования также можно рассчитать и динамичную часть диэлектрического облика почвы. При ее определении на основе данных полевых измерений, также возможны неточности, связанный с невозможностью на практике охватить наблюдениями все варианты динамики свойств почв и влияющих на нее факторов.

Коровая часть георадарного облика может быть использована в качестве интегрального показателя электромагнитного состояния почвы. На основе этой информации возможна классификация почв по их диэлектрическому облику, что может послужить основой для разработки прикладной классификации почв для сельскохозяйственных целей, так как свойства почв, определяющие коровую часть георадарного облика, одновременно предопределяют и плодородие, и качество почв для растениеводства (без учета содержания питательных элементов).

Кроме того, используя данные о диэлектрическом облике почв в качестве некоего интегрального показателя их состояния, может быть создана система оперативного и низкозатратного мониторинга состояния почв для сельскохозяйственных целей.

Таким образом, кроме морфологического, любая почва может и должна быть охарактеризована диэлектрическим обликом, который отражает пространственно-временное варьирование магнитно-электрических свойств почв.

Георадарный облик почв предопределяется диэлектрической проницаемостью и ее динамичностью разных слоев почвы, которые могут соответствовать или не соответствовать выделяемым по морфологическим свойствам генетическим горизонтам почв.

В диэлектрическом облике почвы выделяют его коровую (квазиинвариантную) часть, а также динамичную часть, меняющуюся в сезонном и более коротких по времени циклах.

Это позволяет представлять диэлектрический облик почвы в виде абстрактных моделей-матрешек, которые могут служить основой для георадарного мониторинга свойств почв, что позволяет с новых сторон выявить диалектику почвенного пространства. Кроме того, на их основе возможна прикладная сельскохозяйственная классификация почв по их магнитным и электрическим свойствам. Для этого необходимо проведение подобных исследований для других почв и расширение географии соответствующих экспериментов.

Литература.

1. Савин И.Ю. Классификация почв и земледелие // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2016. № 84. С.3-9. doi: 10.19047/0136-1694-2016-84-3-9
2. Кирюшин В.И. Развитие парадигмы сельскохозяйственного природопользования (к 175-летию В.В. Докучаева) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2021. Д, С. 5-26. doi: 10.19047/0136-1694-2021-D-5-26
3. Анализ показателей почвенного микробиома в процессах, связанных с почвообразованием, трансформацией органического вещества и тонкой регуляции вегетационных процессов / Е.Е. Андронов, Е.А. Иванова, Е.В. Першина и др. // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2015. №80. С. 83-94. doi:10.19047/0136-1694-2015-80-83-94
4. Федотов Г.Н., Шалаев В.С. Основы наноструктурной организации почв. Москва: ФГБОУ ВПО МГУЛ, 2012. 512 с.
5. Позднякова А.Д., Поздняков Л.А. Электрофизические и геоинформационные методы картографирования биологических свойств торфоземов // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2020. №103. С.149-167. doi:10.19047/0136-1694-2020-103-149-167
6. Применение геофизических методов для оценки строения и свойств почв черноземного ряда / В.В. Оленченко, Е.Н. Смоленцева, А.А. Заплавнова и др. // Почвы и окружающая среда. 2019. №2(1). С. 57. doi:10.31251/pos.v2i1.57
7. Методические рекомендации по применению георадаров при обследовании дорожных конструкций. М.: Росавтодор, 2003. 31 с.
8. Воронин А.Я. Критерии идентификации строения и функциональных свойств почвенного профиля в георадиолокационных исследованиях с использованием георадара «Лоза-В» // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2015. №80. С.106-128. doi:10.19047/0136-1694-2015-80-106-128
9. Temporal Monitoring of the Soil Freeze-Thaw Cycles over a Snow-Covered Surface by Using Air-Launched Ground-Penetrating Radar / K.Z. Jadoon, L. Weihermiller, M.F. McCabe et al. // Remote Sensing. 2015. No. 7. P. 12041-1205623.
10. Агроэкологическая оценка взаимосвязей свойств почв во времени и в пространстве / В.И. Савич, В.В. Гукалов, А.Е. Сорокин и др. // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2021. № 106. С. 163-175. doi:10.19047/0136-1694-2021-106-163-175.
11. Воронин А.Я., Савин И.Ю. Связь цвета подповерхностных горизонтов почв с данными георадарного профилирования // Почвоведение. 2020. № 8. С. 983-995.
12. Денисов Р.Р., Капустин В.В. Обработка георадарных данных в автоматическом режиме // Геофизика. 2010. №4. С.76-80.
13. Любушкин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.
14. Annan A. GPR-History, trends, and future developments // *Subsurf. Sens. Technol. Appl.* 2002. No 3. P.253 – 270.
15. Daliels D.J. Ground Penetrating Radar. London: Milton Keynes, 2007. 726 p.
16. Loewer M., Igel J., Wagner N. Spectral Decomposition of Soil Electrical and Dielectric Losses and Prediction of In Situ GPR Performance // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2016. vol. 9, no. 1, P. 212-220, doi: 10.1109/JSTARS.2015.2424152
17. Grote K., Hubbard S., Rubin Y. Field-scale estimation of volumetric water content using GPR ground wave techniques // *Water Resour. Res.* 2003. Vol. 39(11). P. 1321. doi:10.1029/2003WR002045.
18. Uncertainty in Peat Volume and Soil Carbon Estimated Using Ground-Penetrating Radar and Probing / A.D. Parsekian, L. Slater, D. Ntarlagiannis et al. // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2012. Vol. 76:1911–1918. doi:10.2136/sssaj2012.0040
19. Едемский Д.Е., Тумской В.Е., Овсяченко А.Н. Георадиолокационное зондирование отложений в пределах деградирующего полигонального микро-рельефа в Арктике // *Криосфера Земли*. 2021. Т. 25. № 5. С. 55-69.
20. Симаков М.Ю. Симметрии в природе, искусстве, науке, философии. М.: НИЦ-Луч, 2019. 48 с.
21. Большая энциклопедия нефти и газа. URL: <https://www.ngpedia.ru/id139038p1.html> (дата обращения: 12.04.2022).
22. Иванов Д.А., Карасева О.В., Рублюк М.В. Исследование влияния почвенного покрова и рельефа на продуктивность культур // *Достижения науки и техники АПК*. 2021. Т. 35. № 2. С. 19-26.

Поступила в редакцию 26.04.2022

После доработки 20.05.2022

Принята к публикации 20.06.2022