

ДИНАМИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПОРОД И СТРАТИФИКАЦИИ ЗОНЫ АЭРАЦИИ

В. Г. Сугак

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: ire@ire.kharkov.ua*

Изложен метод, позволяющий связать процессы фильтрации влаги в слоях зоны аэрации (ЗА) с их электрическими характеристиками. В основе метода лежит численное решение уравнений фильтрации влаги, в результате чего получается распределение влажности по глубине в ЗА. Затем на основе электродинамической модели, связывающей физические характеристики слоев ЗА с их электрическими характеристиками, вычисляется распределение комплексной диэлектрической проницаемости по глубине. Ил. 8. Табл. 2. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: электрические характеристики пород, зона аэрации, фильтрация влаги.

Одной из проблем, сдерживающих широкое применение георадиолокаторов подповерхностного зондирования для решения задач инженерной геологии, является сложность интерпретации результатов в условиях ограниченной априорной информации. Одна из причин этого - сложность гидрогеологических процессов, связанных с фильтрацией влаги в породах ЗА, которые определяют в значительной мере ее электродинамические свойства [1,2]. Речь идет, в первую очередь, об электрических характеристиках грунтов, которые определяют распространение радиоволн в ЗА и их отражение от неоднородностей, каковыми являются границы литологического состава пород, отдельные неоднородности, обусловленные как флуктуациями влажности, так и другими причинами - слабоконтрастные границы уровня грунтовых вод, жидких нефтепродуктов и пр.

Изучение динамических особенностей электрических характеристик слоев грунта при изменении влажностного режима зоны аэрации дает возможность лучше понимать механизмы рассеяния радиоволн от неоднородностей этой зоны, что может существенно повысить качество интерпретации результатов георадарного зондирования. С другой стороны, разработка моделей фильтрации влаги в ЗА с переходом от физических свойств почвы к электродинамическим характеристикам, описывающим процессы рассеяния радиоволн от неоднородностей этой зоны, позволит продвинуться в решении обратных задач - восстановлении физических свойств этих неоднородностей по результатам подповерхностного радиолокационного зондирования.

1. Особенности фильтрации влаги в ЗА. Решения задач, связанных с фильтрацией влаги и распространением нефтепродуктов в ЗА, базируются на уравнениях фильтрации, массообмена и переноса [3-5].

Принимая поровое пространство и жидкую фазу несжимаемыми, а газовую фазу - сжи-

маемой, уравнения сохранения массы для воды (W), органической жидкости (O) и газа (A), могут быть записаны для трехмерной области в Декартовых координатах:

$$\Phi \frac{\partial S_W}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_{W ij} \left\{ \frac{\partial h_W}{\partial x_j} + \rho_{rw} u_j \right\} \right] + \frac{R_W}{\rho_W}; \quad (1,а)$$

$$\Phi \frac{\partial S_O}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_{O ij} \left\{ \frac{\partial h_O}{\partial x_j} + \rho_{ro} u_j \right\} \right] + \frac{R_O}{\rho_O}; \quad (1,б)$$

$$\begin{aligned} \Phi \frac{\partial \rho_A S_A}{\partial t} = \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\rho_A K_{A ij} \left\{ \frac{\partial h_A}{\partial x_j} + \rho_{rA} u_j \right\} \right] + R_A, \end{aligned} \quad (1,в)$$

где Φ - пористость; S_P - насыщенность P -й фазы (индекс P принимает значения W , O или A); x_i, x_j - пространственные Декартовы координаты ($i, j = 1, 2, 3$); $K_{P ij}$ - тензор коэффициента фильтрации для фазы P ; $h_P = \frac{P_P}{g \rho_W^*}$ - давление фазы P , измеряемое в высотах водного столба, P_P - давление фазы P , g - ускорение свободного падения, ρ_W^* - плотность чистой воды; ρ_P - плотность фазы P ; $\rho_{rp} = \frac{\rho_P}{\rho_W^*}$ - относительная плотность фазы P ; $u_j = \frac{\partial z}{\partial x_j}$ - единичный гравитационный вектор, положительный в восходящем направлении; z - расстояние по вертикали от плоскости сравнения; R_P - объемная плотность источника, поступающего в фазу (+) или из фазы (-) P ; t - время.

Величина в квадратных скобках:

$$- K_{Pij} \left\{ \frac{\partial h_p}{\partial x_j} + \rho_{rp} u_j \right\} = q_{Pi}$$
 носит определение

скорости Дарси в фазе P в направлении i .

Если насыщенность флюида - неявная функция фазовых давлений, уравнения (1) могут быть решены, используя фазовые давления в качестве основных переменных.

2. Начальные и граничные условия.

Начальные условия для каждой фазы P должны быть заданы по всей области потока R как:

$$h_p(x_i, 0) = h_{p1}(x_i) \text{ по } R \text{ для } t = 0. \quad (2)$$

Граничные условия могут быть заданы как границы первого и второго родов следующим образом:

$$h_p(x_i, t) = h_{p2}(x_i, t) \text{ по } S_1 \text{ для } t > 0, \quad (2,а)$$

$$q_{Pi} n_i = \hat{q}_{Pi}(x_i, t) \text{ по } S_2 \text{ для } t > 0. \quad (2,б)$$

Уравнение (2,а) задает граничное условие первого рода на границах области S_1 . Условие первого рода для водной фазы выполняется на границах внутри насыщенного водоносного горизонта, где положительные значения давлений задаются согласно принятым вертикальным гидростатическим условиям (т. е. $h_w = z_{wi} - z$, где z_{wi} - уровень подземных вод; h_w - давление воды на уровне z). Условие первого рода справедливо на границах просачивания для воды и нефти, если просачивание происходит при постоянном давлении (поверхностный разлив свободной жидкости). Граничные условия по газовой фазе в основном соответствуют условию первого рода. Это нулевое давление на поверхности при контакте с атмосферой, а также отрицательное или положительное давление при вакуумировании или в точках закачки.

Уравнение (2,б) обозначает граничное условие второго рода (поток жидкости), где $\hat{q}_{Pi}(x_i, t)$ - проекция вектора потока на нормаль к границе. Частный случай граничного условия второго рода - нулевой по нормали к границе поток (непроницаемая граница). Граничное условие ненулевого потока будет обычно задано на участках границ, вдоль которых известны скорости притока. Задание скоростей оттока флюида также возможно, однако могут возникнуть некоторые трудности, так как скорости оттока часто зависят от фильтрационных свойств, которые не постоянны.

Для решения (1) необходимо иметь зависимости между фазовыми давлениями, насыщенностями и коэффициентами фильтрации. Для описания насыщенность - капиллярное давление, используют капиллярное давление

$$h_{aw} = h_a - h_w, \quad (3,а)$$

$$h_{ow} = h_o - h_w, \quad (3,б)$$

$$h_{ao} = h_a - h_o, \quad (3,в)$$

где h_{aw} , h_{ow} , h_{ao} - фазовые капиллярные давления газа в воде, нефтепродукта в воде и газа в нефтепродукте соответственно.

Зависимости, связывающие фазовые капиллярные давления с насыщенностями, являются эмпирическими. Параметры таких эмпирических зависимостей определяют из экспериментов или используются результаты предыдущих экспериментов.

В работе [4] обоснован подход, позволяющий распространить результаты опытов в двухфазной системе на трехфазную. Для двухфазной системы вода - воздух в настоящее время наиболее часто применяется эмпирическая функция Ван Генухтена [6]:

$$\bar{S}_w = \begin{cases} \left[1 + \alpha h_{aw}^n \right]^{-m} & h_{aw} > 0 \\ 1 & h_{aw} \leq 0 \end{cases}, \quad (4)$$

где $\bar{S}_w = S_w - S_m / (1 - S_m)$ - "эффективная" насыщенность поровой среды водой; S_m - "остаточная" (неизвлекаемая) насыщенность по воде; α и n - параметры поровой среды и $m = 1 - 1/n$.

Функция Ван Генухтена широко используется при решении задач, связанных с влагопереносом в зоне аэрации.

Уравнения (1) описывают процессы в наиболее общем случае, когда кроме влаги рассматривается наличие загрязнителя, в частности, жидких нефтепродуктов. В реальных ситуациях нефтепродукты присутствуют не только в нефтяной фазе. В результате массообмена они оказываются также в воде и воздухе.

Следует отметить также, что нефтепродукты - это многокомпонентные смеси, и каждая из компонент, как правило, характеризуется своими индивидуальными свойствами, способностями к массообмену и переносу. Для того, чтобы решать задачи, связанные с восстановлением окружающей среды, загрязненной нефтепродуктами, необходимы модели, учитывающие не только многофазную фильтрацию, но и многокомпонентный перенос и массообмен.

Показано [7], что такие модели описываются системой фазовых уравнений переноса и массообмена для каждой из компонент. Показано также, что для целей упрощения последующего решения такие системы могут быть сведены к одному объединенному уравнению. Объединение уравнений может быть проведено для равновесного и неравновесного массообмена.

3. Свойства грунтов. Для расчетов многофазной фильтрации необходимы следующие параметры: коэффициент фильтрации насыщенной пористой среды в вертикальном $K_{W_{zz}}$ и горизонтальном $K_{W_{xx}}$ направлениях, пористость грунта Φ , остаточная насыщенность пор грунта водой S_m , максимальная остаточная насыщенность нефтепродуктами в случае промачивания грунта водой S_{or}^{max} и параметры эмпирической модели Ван Генухтена α и n для двухфазной системы вода - воздух.

Параметры модели Ван Генухтена могут быть получены на основе использования данных о гранулометрическом составе грунтов [7]. Результаты лабораторных определений параметров собраны в открытой базе данных UNSODA на сервере Агентства охраны окружающей среды США (EPA USA). Характерные значения параметров приведены в табл. 1.

Таблица 1

Тип почвы	K_{sw} , [м/сут]	Φ , [-]	S_m , [-]	α , [м-1]	n , [-]
Песок	7,1	0,43	0,09	14,5	2,7
Суглинистый песок	3,5	0,41	0,15	12,4	2,3
Песчаный суглинок	1,06	0,41	0,15	7,50	1,9
Песчаный глинистый суглинок	0,31	0,39	0,26	5,9	1,5
Суглинок	0,25	0,43	0,19	3,6	1,6
Алевритовый суглинок	0,11	0,45	0,16	2,0	1,4
Глинистый суглинок	0,062	0,41	0,22	1,9	1,3
Алеврит	0,060	0,43	0,07	1,6	1,4
Опесчаненная глина	0,029	0,38	0,26	2,7	1,2
Алевритовый глинистый суглинок	0,017	0,43	0,21	1,0	1,2
Алевритовый суглинок	0,0048	0,36	0,19	0,5	1,1

Типичные значения для остаточной нефтенасыщенности S_{or}^{max} находятся в диапазоне от 0,15 до 0,35. Это значение имеет тенденцию возрастать в случае увеличения неоднородности грунтов и увеличения вязкости жидкостей.

4. Численное моделирование фильтрации влаги в типовых зонах аэрации и ее строении. Среди многочисленных возможных вариантов структуры ЗА можно выделить наиболее про-

стые, которые встречаются на практике и представляют интерес при геофизических изысканиях с применением георадаров. К таковым относятся:

- ЗА, в которой вначале располагается слой песка, а затем слой суглинка. Это наиболее легкий вариант с точки зрения подповерхностного зондирования.

- ЗА, в которой первым от поверхности слоем является слой суглинка, литологический состав которого различен, но при всем различии это смесь одного из типов песка и глинистых фракций при различном весовом соотношении. Вторым слоем является слой песка, в котором может располагаться уровень грунтовых вод. Толщины этих слоев могут быть различными, но на практике их значения колеблются обычно от нескольких метров до десятка метров.

Варианты, в которых присутствуют слои глины, встречаются реже. Фильтрация влаги и в таких слоях происходит очень медленно. Такие слои обычно являются водоупорными слоями и их граница располагается на глубинах, ниже которых структура грунта относительно однородна. Этот случай представляет практический интерес с точки зрения задач инженерной геологии только в случае картирования прослоек глины, располагающихся в верхних слоях ЗА.

Ниже приведены результаты численного моделирования фильтрации влаги в указанных двух типах ЗА. На рис. 1, 2 приведены типичные структуры ЗА для этих случаев. На рис. 1 приведено строение ЗА, соответствующее ее первому типу, т. е. в слое песка находится прослойка суглинка песчаного. Размеры области пространства выбраны, исходя из соблюдения условия о существенном ее превышении размеров зон, в которых объемная влажность меняется от одного установившегося значения к другому при переходе границы между слоями или от границы уровня грунтовых вод к установившемуся значению влажности в слое, что определяется формулой Ван Генухтена (4). Свойства почвы даны в табл. 2. На рис. 2 приведено строение ЗА второго типа: в слое суглинка находится прослойка песка.

Таблица 2

Название параметра	Песок	Суглинок песчаный
K_{zz}/K_{hh}	1	1
Насыщенное значение K_{hh}	$2,4e-5$	$8,1e-6$
Пористость	0,377	0,496
α	1,04	0,847
n	6,9	4,8
Остаточная насыщенность	0,072	0,15

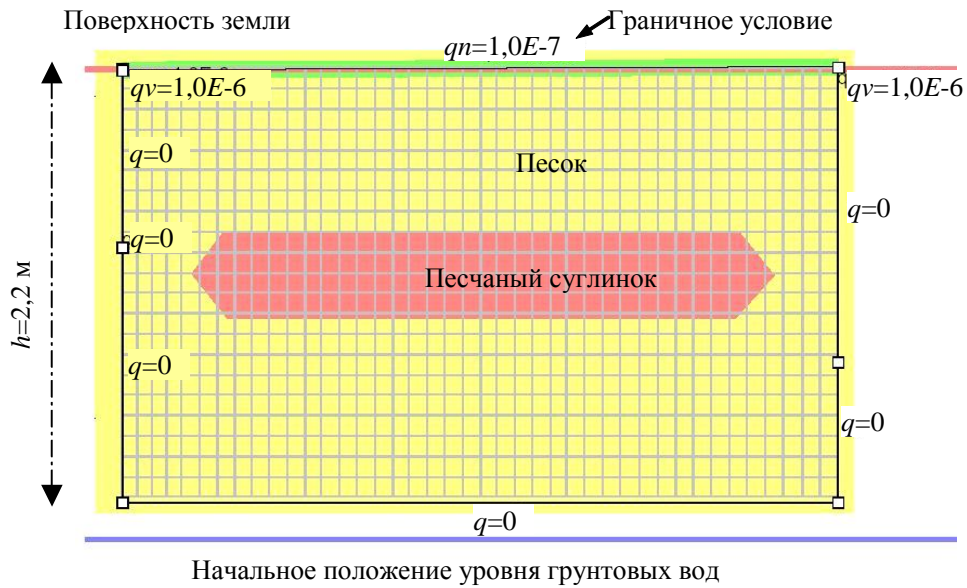


Рис. 1. Ограниченная область зоны аэрации первого типа, используемая в численной модели фильтрации влаги

Размер элементарной ячейки в модели составлял порядка 10 см. Граничные условия выбраны следующим образом. Левая, нижняя и правая границы выбраны непроницаемыми для потока

воды. На верхней границе задан источник влаги, эквивалентный осадкам в виде дождя с интенсивностью 3 мм/ч.

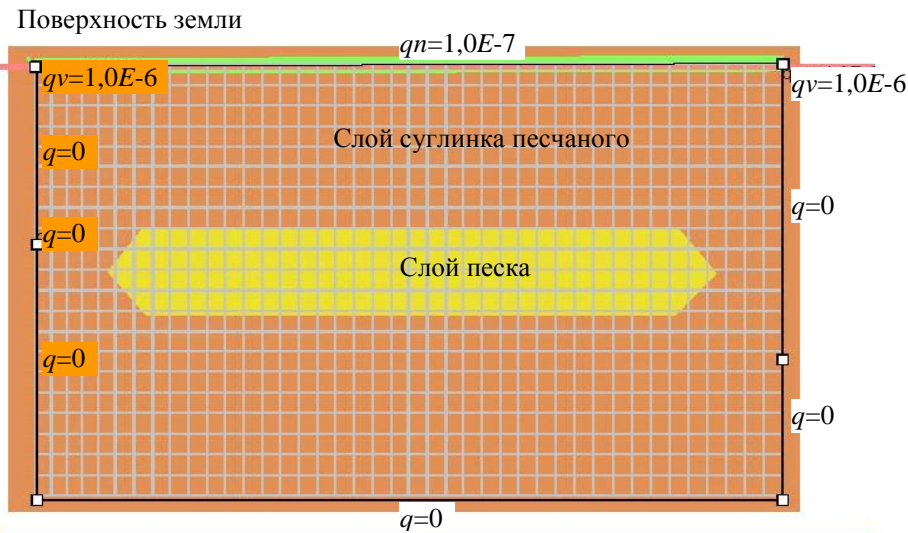


Рис. 2. Ограниченная область зоны аэрации второго типа, используемая в численной модели фильтрации влаги

В качестве основных выводов, следующих из результатов моделирования фильтрации влаги в ЗА, должны быть выводы о зависимости объемного содержания влаги от глубины по всей глубине ЗА. Эти зависимости будут использованы в дальнейшем для расчета распределения электрических характеристик почвы по глубине, которые будут получены с таким же дискретным шагом по глубине, как и в фильтрационной модели, т. е. с дискретным шагом 10 см.

В результате моделирования были получены распределения объемной влажности по глубине для всего выбранного пространства. По этим данным можно построить графики распределения объемной влажности по глубине в любом сечении ЗА плоскостью, перпендикулярной к плоскости рисунков. На рис. 3 и рис. 4 приведены указанные распределения для ЗА первого и второго типа в сечении, которое соответствует примерно середине рисунков. Таким образом, метод позволяет

связать гидродинамические процессы фильтрации влаги в зоне аэрации, которые определяют распределение влаги по глубине этой зоны, с соответствующим распределением комплексной диэлектрической проницаемости по глубине этой зоны.

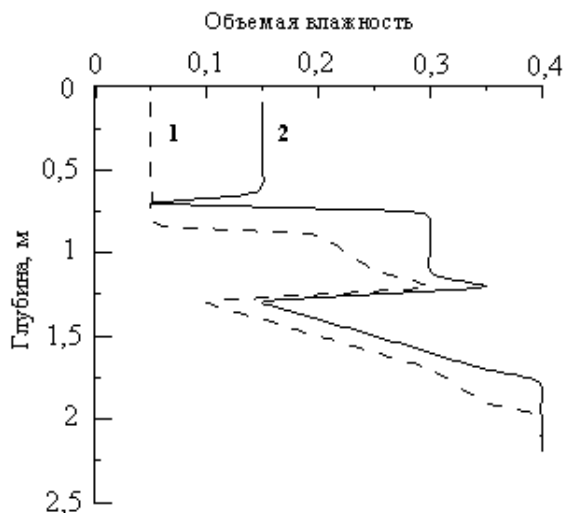


Рис. 3. Распределение объемной влажности по глубине для зоны аэрации первого типа: кривая 1 - до выпадения осадков; кривая 2 - при выпадении осадков интенсивностью 3 мм/ч в течение 100 ч.

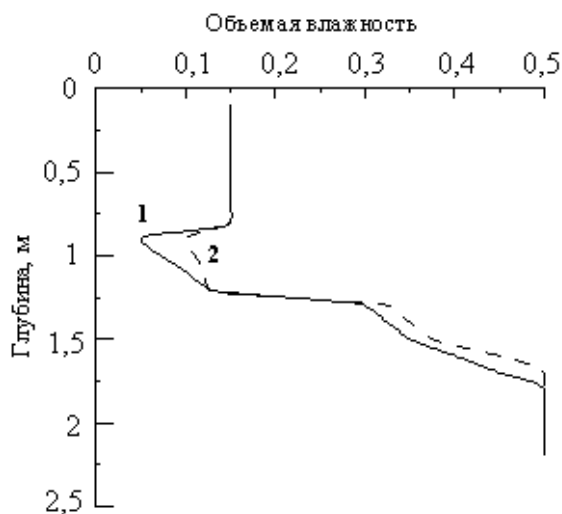


Рис. 4. Распределение объемной влажности по глубине для зоны аэрации второго типа: кривая 1 - без выпадения осадков; кривая 2 - при выпадении осадков интенсивностью 3 мм/ч в течение 100 ч.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать выводы.

- Характер распределения объемной влажности по глубине при переходе через границу слоев зависит от их литологического состава и последовательности. Например, скачок влажно-

сти больше в том случае, когда первым от поверхности слоем является слой песка, а вторым - слой суглинка песчаного (т. е. при переходе от слоя с большим значением коэффициента фильтрации к слою с малым его значением), особенно, в случае выпадения осадков. Тогда на границе этих слоев возникает скачок влажности, причем вначале, непосредственно перед границей суглинка, объемная влажность резко уменьшается, а затем также резко возрастает до существенных значений (около 0,3). Это видно из рис. 3, на котором приведены кривые распределения влажности по глубине ЗА первого типа. Объясняется это тем, что в тонком слое непосредственно перед слоем суглинка влага резко отфильтровывается этим слоем вследствие его способности более сильно аккумулировать влагу.

- Переходная область от полного насыщения слоя песка (область грунтовой воды) до установившейся влажности в этом слое составляет около 50 см.

В случае ЗА второго типа, ситуация отличается.

- Скачок влажности на первой от поверхности границе (при переходе со слоя суглинка песчаного к песку) существенно меньше, так как вследствие малости коэффициента фильтрации в слое суглинка песчаного объемная влажность в нем аккумулируется очень медленно. Поэтому при такой интенсивности осадков объемная влажность в этом слое существенно не меняется, в то время как слой песка за счет большего коэффициента фильтрации аккумулирует в себе больше влаги.

- Установившееся значение объемной влажности в прослойке песка (около 10%) существенно меньше, чем соответствующее значение в прослойке суглинка песчаного (ЗА первого типа), составляющее примерно 30%.

- Переходная область от полного насыщения слоя суглинка песчаного (область грунтовой воды) до установившейся влажности в этом слое составляет около 25-30 см.

Для перехода к распределению электрических характеристик по глубине ЗА применим модель электрических характеристик, описанную в работе [8], к результатам моделирования фильтрации влаги для двух типовых структур ЗА, описанных выше. Для этого по кривым зависимости влажности в грунте от глубины, приведенным на рис. 3 и 4, с учетом литологического состава пород в каждом слое рассчитывались относительная диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость. Результаты этих расчетов приведены ниже на рис. 5 - 8.

На рис. 5, который соответствует ЗА первого типа, приведены зависимости относительной диэлектрической проницаемости от глубины. На

рис. 6 приведены кривые зависимости удельной проводимости от глубины.

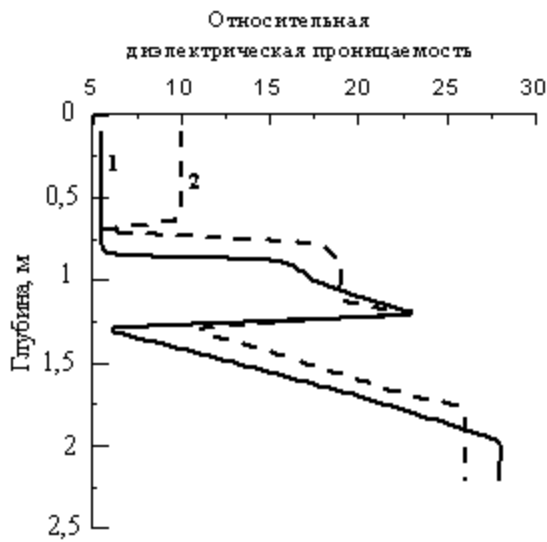


Рис. 5. Распределение относительной диэлектрической проницаемости по глубине в ЗА первого типа до выпадения (кривая 1) и после выпадения осадков (кривая 2) в виде дождя интенсивностью 3 мм/ч в течение 100 ч.

На рис. 6 и 7 приведены аналогичные зависимости для ЗА второго типа.

Из рисунков можно видеть, что в целом ход зависимостей электрических характеристик в слоях ЗА первого и второго типов совпадает с ходом зависимостей, описывающих распределение влаги по глубине.

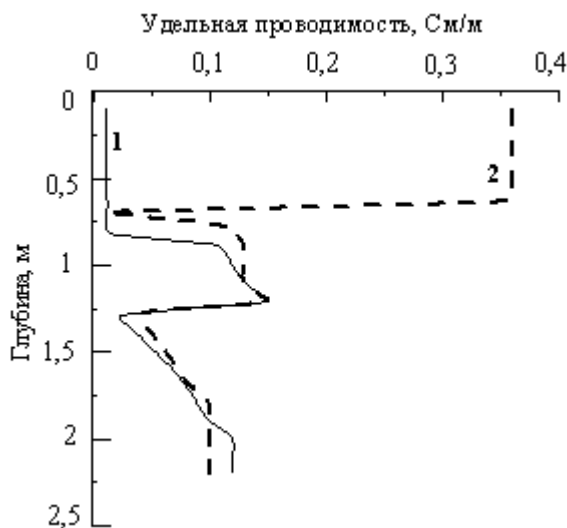


Рис. 6. Распределение удельной проводимости по глубине в ЗА первого типа до выпадения (кривая 1) и после выпадения осадков (кривая 2) в виде дождя интенсивностью 3 мм/ч в течение 100 ч.

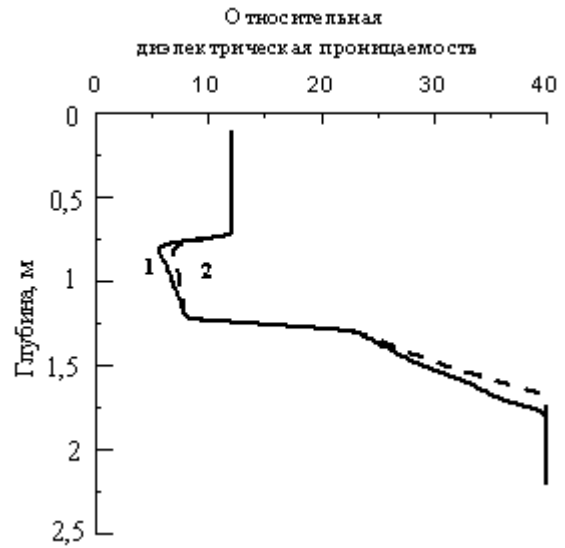


Рис. 7. Распределение относительной диэлектрической проницаемости по глубине в ЗА второго типа до выпадения (кривая 1) и после выпадения осадков (кривая 2) в виде дождя интенсивностью 3 мм/ч в течение 100 ч.

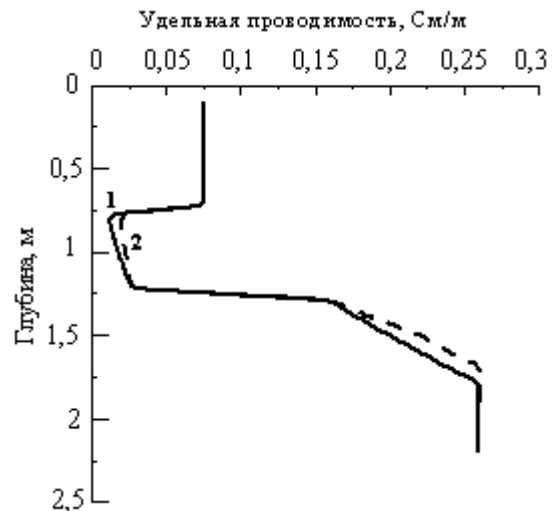


Рис. 8. Распределение удельной проводимости по глубине в ЗА второго типа до выпадения (кривая 1) и после выпадения осадков (кривая 2) в виде дождя интенсивностью 3 мм/ч в течение 100 ч.

Выводы. Анализ полученных результатов показывает, что выпадение осадков для ЗА второго типа существенно меньше сказывается на изменении электрических характеристик в первом от поверхности Земли слое и на первой границе (в данном случае суглинок - песок), чем для ЗА первого типа. В ЗА первого типа эти изменения имеют порядок величин 4 ед. для ϵ' и 0,34 См/м для σ .

Скачок электрических характеристик на второй от поверхности границе имеет разный знак для ЗА первого и второго типов. В частно-

сти, в ЗА второго типа электрические характеристики изменяются от меньших значений к большим (от 8 ед. для ε' до 25 ед. и для σ от 0,025 до 0,175 См/м), в то время как для ЗА первого типа эти характеристики меняются от больших значений к меньшим (для ε' от 23 до 6 и для σ от 0,15 до 0,03 См/м).

В ЗА второго типа скачок относительной диэлектрической проницаемости и удельной проводимости на первой границе (в данном случае суглинок - песок) существенно меньше, чем для ЗА первого типа (песок-суглинок). Для ЗА второго типа диэлектрическая проницаемость ε' изменяется на 5-7 ед., а удельная проводимость σ на 0,055 См/м, в то время как для ЗА первого типа ε' меняется на 10-15 ед., а σ - на 0,35 См/м.

Таким образом, приведенные результаты показывают, что изменение фильтрационных свойств пород ЗА существенно сказывается на изменении их электрических характеристик.

Диапазон изменения электрических характеристик по глубине ЗА существенно зависит от ее стратификации (значение имеет как литологический состав пород, так и их особенности расположения по глубине).

1. Scott W. R. and Smith G. S. Measured Electrical Constitutive Parameters of Soil as Functions of Frequency and Moisture Content // IEEE Trans, on Geosci. Remote Sensing. - 1992. - 30. - P.621-623.
2. Сугак В. Г., Овчинкин О. А., Сугак А. В. Интерпретация результатов георадиолокационного подповерхностного зондирования в условиях отсутствия априорных данных // Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 2005. - 11, №1. - С.78-86.
3. Bear J. Dynamics of Fluids in Porous Media: American Elsevier. - New York. - 1972. - 344 p.
4. Parker J. C. Multiphase flow and transport in porous media. Reviews of Geophysics. - 1989. - 27. - P.311-328.
5. Parke J. C., Lenhard R. J., Koppusamy T. A parametric model for constitutive properties governing multiphase flow in porous media. Water Resour. - 1987. - Res. 23. - P.618-624.
6. Van Genuchten M. Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. 44. - P.892-898.

7. Katyal A. K., Kaluarachchi J. J., Parker J. C. MOFAT: A Two-Dimensional Finite Element Program for Multiphase Flow and Multicomponent Transport. Virginia Polytechnic Inst. and State Univ., Blacksburg. - 1991.

8. Овчинкин О. А., Сугак В. Г. Влияние электрических свойств грунта на характеристики сигнала при подповерхностном зондировании // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 2001. - 6, №2-3. - С.235-241.

DYNAMICAL PROPERTIES OF SOIL ELECTRIC CHARACTERISTICS DEPENDING ON FILTERING PROPERTIES OF ROCK AND STRATIFICATION OF A ZONE OF AERATION

V. G. Sugak

It is stated method allowing to connect moisture filtering processes in subsurface layers of zone of aeration (ZA) with their electrical constants. The method is based on numerical decision of moisture filtering equations. As a result it is obtained a distribution of moisture in ZA on depth. And on the basis of electro dynamical model of electrical constants of soils it is calculated a distribution of complex dielectrical permeability on a depth.

Key words: electric characteristics of rock, zone of aeration, moisture filtering.

ДИНАМІКА ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ҐРУНТІВ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ФІЛЬТРАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОРІД ТА СТРАТИФІКАЦІЇ ЗОНИ АЕРАЦІЇ

В. Г. Сугак

Викладено метод, що дозволяє зв'язати процеси фільтрації вологи в шарах зони аерації (ЗА) з їхніми електричними сталими. В основі методу лежить чисельне рішення рівнянь фільтрації вологи, у результаті чого виходить розподіл вологості по глибині в ЗА. Потім на основі електродинамічної моделі, що зв'язує фізичні характеристики шарів ЗА з їхніми електричними характеристиками, обчислюється розподіл комплексної діелектричної проникності по глибині.

Ключові слова: електричні характеристики порід, зона аерації, фільтрація вологи.

Рукопись поступила 9 ноября 2006 г.