

## К возможности радиофизического мониторинга верхней подповерхностной структуры Земли

В. В. Кузьмин, В. Г. Сугак

*Институт радиофизики и электроники  
Национальной Академии наук Украины,  
Украина, 310085, Харьков, ул. Ак. Проскуры, 12*

*Статья поступила в редакцию 6 октября 1997 г.*

Приведены результаты измерений зависимости относительной диэлектрической проницаемости и удельной проводимости типичных грунтов зоны аэрации (суглинок и песок) от влажности и степени насыщения нефтепродуктом в полосе радиочастот 40...150 МГц, проведенных как в лабораторных условиях, так и в лизиметре, в условиях их естественной стратификации. На основе данных о глубинах залегания слоев типичных зон аэрации, средней влажности и градиентах ее изменения по глубине, обусловленных различного рода неоднородностями, оценены возможности радиофизического подповерхностного мониторинга с целью картографирования зон загрязнения почв нефтепродуктами.

Наведено результати вимірів залежності відносної діелектричної проникності і питомої провідності типових ґрунтів зони аерації (суглинок і пісок) від вологості і міри насичення нафтопродуктом, проведених як в лабораторних умовах, так і в природних умовах їх стратифікації в лізіметрі в смузі радіочастот 40...150 МГц. На основі даних про глибини залягання шарів типових зон аерації, середньої вологості і градієнти її зміни по глибині, обумовлених різноманітного роду неоднорідностями, оцінено можливості радіофізичного підповерхневого моніторингу з метою картографування зон забруднення ґрунтів нафтопродуктами.

### 1. Введение

Одним из приоритетных направлений развития радиофизических методов зондирования Земли в настоящее время является мониторинг подповерхностной структуры слоев до уровня грунтовых вод, т.е. зоны аэрации (ЗА). Помимо задач картографирования слоев этой зоны (суглинок, супесь, глины, песок и т.п.) в последнее время появились задачи, обусловленные проблемами защиты окружающей среды. Среди таких задач важное место занимает защита подземных вод от загрязнений нефтепродуктами. Это связано с наличием значительного числа объектов - источников загрязнения окружающей природной среды, высокой токсичностью нефтепродуктов (НП) и продуктов их распада.

Разработка природоохранных мероприятий требует оперативной оценки масштабов загрязнения, определения глубины залегания, мощности и направления распространения загрязнения. Решение этих задач определяется знанием электрических свойств грунтов, составляющих ЗА, в частности, их зависимости от насыщения нефтепродуктами по глубине залегания, которая связана, в первую очередь, с распределением влажности по глубине. Основным интересом представляет информация об относительной диэлектрической проницаемости и удельной проводимости в полосе частот от десятков до сотен мегагерц. Выбор частот-

ного диапазона определялся требованиями минимального затухания радиоволн и необходимой разрешающей способности по глубине (десятки сантиметров). В литературе недостаточно освещены электрические характеристики типичных слоев ЗА в их естественном состоянии и особенно при насыщении их нефтепродуктами [1].

### 2. Экспериментальные измерения электрических свойств грунтов в полосе частот 40 ÷ 150 МГц

Исследования влияния влажности и наличия нефтепродуктов на электрические характеристики некоторых типов грунтов в диапазоне частот от 40 до 150 МГц были проведены в лабораторных условиях и в лизиметре (оборудованной специальными дренами и датчиками колонне высотой около 2 м и сечением 1 м<sup>2</sup>, с расположением слоев песка и суглинка, соответствующим типичной ЗА). На рис. 1 показана схема лизиметра с размещенными в ней слоями песка и суглинка и расположение датчиков. Всего в колонне было оборудовано 5 датчиков, 2 из которых располагались в песке через 10 см по глубине друг от друга, а оставшиеся три - в слое суглинка - через 20 см. Электрические характеристики переходных слоев (от границ, соответствующих уровню грунтовых вод (УГВ) или уровню НП в слое, до глубины с установленным значением влажности

или НП) можно было измерять при плавном поднятии УГВ или нефтепродукта с помощью специально оборудованных дрен, через которые заливалась вода или НП. В этом случае датчик последовательно во времени проходил состояния, соответствующие разному положению в переходном слое. Были получены также данные об изменении электрических характеристик грунта по глубине при переходе от границы слоя суглинка к слою песка с установившимся значением влажности и наоборот (неоднородные слои).

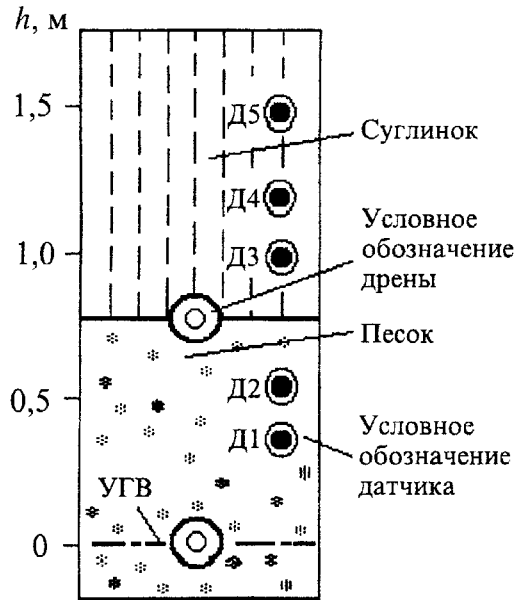


Рис. 1. Условная схема лизиметра с расположением измерительных датчиков и дрен

Электрические характеристики грунтов измерялись с помощью специально разработанных датчиков коаксиального типа и измерителя полных сопротивлений ИПС-2 методом измерения в коаксиальном волноводе модуля и фазы коэффициента отражения радиоволны от неоднородности, в качестве которой использовалось объемное включение исследуемого образца. Методика подобных измерений подробно описана, например, в работе [1]. Исследуемый грунт при таких измерениях обычно предварительно перемалывается, что приводит к полному разрушению структуры вещества, которая как раз и является за счет наличия мелких капилляров, остатков корневой системы растений, мелких включений различного характера и т.п. основным фактором, определяющим влажностные, а значит и электрические характеристики образца. Поэтому конструктивно наш датчик представлял собой открытый отрезок жесткой коаксиальной линии с тонкими стенками длиной примерно 2 см, соединенный кабелем с ИПС-2. Датчик можно было погружать в исследуемый грунт без существенного

механического нарушения его структуры. Изменялось комплексное сопротивление образца породы примерно такой же длины, заполняющего внутреннее пространство датчика от разомкнутого конца отрезка коаксиальной линии, при диаметре внешнего проводника 2,6 см. Известное соотношение между коэффициентом отражения  $\Gamma$  от заполненного исследуемым образцом отрезка коаксиальной линии и комплексным сопротивлением  $Z_H$ :

$$Z_H = Z_0 \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}, \quad (1)$$

где  $Z_0$  - волновое сопротивление коаксиальной линии (в наших экспериментах выбиралось равным 50 Ом), дает возможность рассчитать электрические характеристики исследуемого образца. В данном случае комплексное сопротивление  $Z_H$  равно:

$$Z_H = Z_0 \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{ef}}} \operatorname{cth} \gamma l, \quad (2)$$

где  $\epsilon_{ef}$  - эффективная диэлектрическая проницаемость исследуемого образца породы,  $\gamma$  - комплексный коэффициент распространения радиоволны в образце,  $l$  - длина образца.

Используя приведенные формулы, по реактивной и активной частям комплексного сопротивления легко рассчитать относительную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$  (в дальнейшем для краткости диэлектрическая проницаемость) и удельную проводимость  $\sigma$  [См/м]. Суммарная погрешность измерений составляла по нашим оценкам примерно 10% и 10-15% при измерении, соответственно, диэлектрической проницаемости и удельной проводимости в указанном выше диапазоне частот.

Лабораторные эксперименты были проведены с образцами слабоглинистого, алевроитового суглинка, в состав которого входили: песчаные фракции (33,22%), алевроитовые фракции (40,71%) и глинистая фракция (26,07%). Указанные образцы нарезались стандартным геологическим способом из керна исследуемой породы. Каждый образец представлял собой цилиндр диаметром примерно 5 см и высотой 3 см.

Перед экспериментом предварительно определялась объемная пористость образцов путем выпаривания из них влаги в специальных сушильных камерах по стандартной методике. Затем добавлялись в необходимом количестве вода и нефтепродукт (керосин), что позволяло исследовать зависимость электрических характеристик от объемной влажности и объемного содержания нефтепродуктов с достаточной точностью (погрешность

фиксирования концентрации влаги и нефтепродукта не превышала  $5 \div 10 \%$ ) по отношению к объему пор.

Основным результатом лабораторных измерений  $\epsilon$  и  $\sigma$  в зависимости от процентного содержания влаги ( $W$ ) и НП стал следующий вывод:

- введение нефтепродукта во влажный суглинок приводит к увеличению относительной диэлектрической проницаемости в указанной полосе частот примерно на  $6 \div 23$  единиц (первая цифра здесь и в дальнейшем соответствует верхней частоте 150 МГц, а вторая нижней - 40 МГц) при влажности  $W=40 \%$  и при 20% содержании нефтепродукта. При увеличении содержания последнего до 40% наблюдается некоторое уменьшение  $\epsilon$  на  $2 \div 7$  ед., и на  $1,5 \div 9$  единиц при  $W=20 \%$  и концентрации нефтепродукта равной 20%. Удельная проводимость при добавлении нефтепродукта незначительно увеличивается (на 10% при  $W=20 \%$  и на  $20 \div 30 \%$  при изменении концентрации нефтепродукта с 20% до 40%). На рис. 2 в качестве примера представлены результаты измерений электрических характеристик суглинка в зависимости от частоты при  $W=40 \%$  и разной степени насыщения нефтепродуктом (обозначено как +НП(%)).

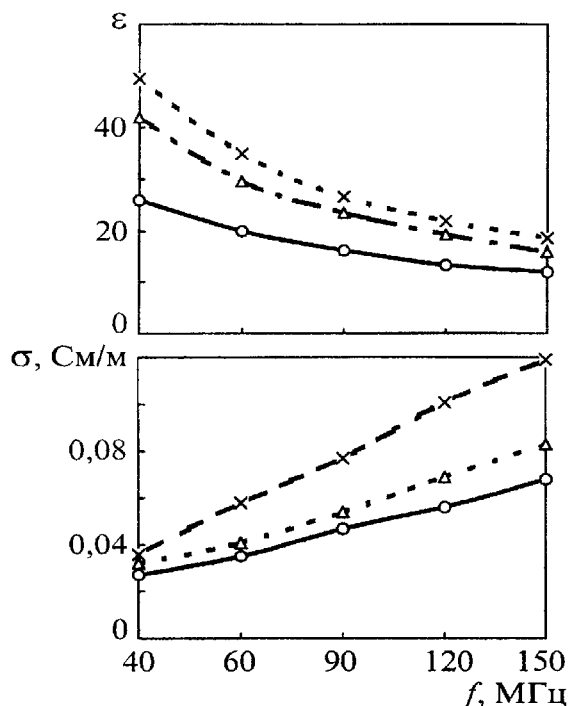


Рис. 2. Электрические характеристики суглинка в зависимости от степени насыщения нефтепродуктом (+НП(%)) при влажности 40% (—•—  $W=40\%$ ; - - x - - +НП(20%); -Δ- +НП(40%))

Основной целью измерений в лизиметре было изучение распределения электрических характеристик по слоям грунта при естественной установившейся влажности по глубине, при различных влажностных условиях в слоях и при насыщении последних нефтепродуктом.

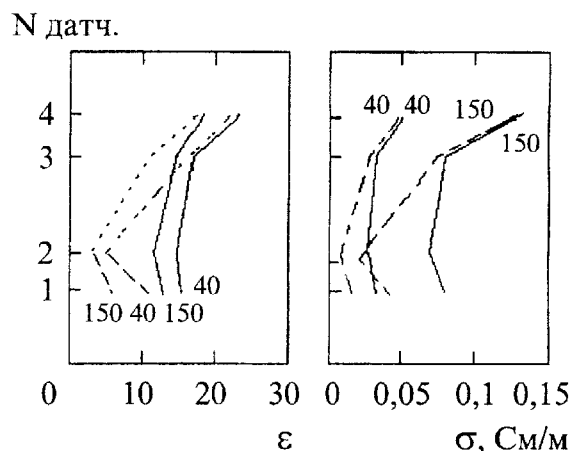


Рис. 3. Изменение распределения электрических характеристик по глубине лизиметра в результате насыщения слоя песка нефтепродуктом

На рис. 3 показано распределение диэлектрической проницаемости и удельной проводимости по глубине в лизиметре до проведения экспериментов (т. е. при установившихся значениях влажности по глубине) и при заполнении слоя на уровне 1-го и 2-го датчиков нефтепродуктом. Цифрами возле кривых обозначены частоты, на которых были измерены соответствующие значения электрических характеристик. Пунктирные линии соответствуют исходному состоянию грунтов лизиметра (т. е. при установившихся значениях влажности в слоях) до проведения экспериментов с заливкой воды и дизтоплива. Сплошные линии демонстрируют ситуацию, когда датчики  $d_1$  и  $d_2$  находятся в слое дизтоплива, залитого через специальную дренажную трубу, расположенную на уровне примерно на 10 см ниже 2-го датчика.

Видно, что диэлектрическая проницаемость при переходе из слоя песка в слой суглинка изменяется от  $4 \div 6$  до  $10 \div 15$  в полосе частот  $40 \div 150$  МГц. Соответствующие изменения удельной проводимости при этом составляют от  $0,01 \div 0,025$  См/м до  $0,02 \div 0,06$  См/м. Это видно из хода пунктирных кривых, соответствующих естественному состоянию грунта до начала экспериментов.

Насыщение слоя песка нефтепродуктом приводит к увеличению диэлектрической проницаемости примерно на 12 ед (в области расположения 2-го датчика) и увеличению удельной проводимости с  $0,01 \div 0,025$  См/м до  $0,02 \div 0,04$  См/м. Это видно из сравнения сплошных кривых, соответ-

вующих эксперименту с насыщением слоя песка НП, с пунктирными. Необходимо учитывать, что при насыщении слоя НП через дрена, расположенную чуть ниже 1-го датчика, происходит вытеснение влаги по направлению к поверхности лизиметра, что, по-видимому, приводит к такому существенному увеличению удельной проводимости в 1-ом и 2-м датчиках.

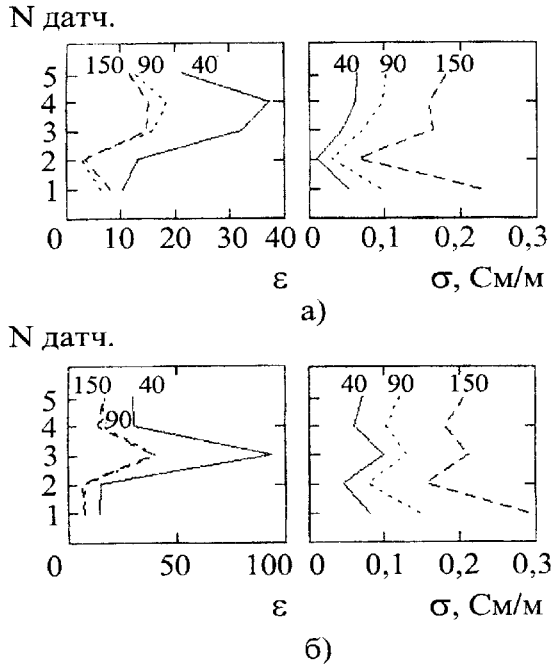


Рис. 4. Изменение распределения электрических характеристик по глубине лизиметра в результате насыщения слоя суглинка нефтепродуктом. а) - до насыщения НП, б) - после насыщения НП

На рис. 4 показано распределение относительной диэлектрической проницаемости и проводимости по слоям в лизиметре до и после насыщения нефтепродуктом слоя суглинка (на уровне 4-го и 5-го датчиков). Видно по 4-му и 5-му датчикам, что диэлектрическая проницаемость при насыщении слоя суглинка нефтепродуктом увеличивается от  $10 \div 20$  до  $20 \div 30$  в полосе частот  $40 \div 150$  МГц. Соответствующее увеличение удельной проводимости при этом составляет от  $0,05 \div 0,18$  до  $0,075 \div 0,21$  См/м.

Насыщение слоя суглинка нефтепродуктом приводит также к вытеснению воды в более глубокий слой, что видно по перемещению максимума значений удельной проводимости от 4-го датчика к 3-ему.

Эксперименты по определению толщины переходного слоя проводились при плавном поднятии УГВ и измерении электрических характеристик соответствующего датчика. В результате экспериментов были получены следующие примерные значения толщины переходных слоев: для песка - порядка  $10 \div 20$  см; для суглинка - порядка  $20 \div 30$  см.

Таким образом, электрические характеристики грунтов 3А существенно зависят от глубины залегания, влажности и насыщения их нефтепродуктом.

### 3. Некоторые соображения о механизме образования смеси из влажного грунта и нефтепродукта

Существенное увеличение относительной диэлектрической проницаемости при введении нефтепродукта во влажный суглинок или песок указывает на сложный механизм образования смеси из частиц пород, воды и нефтепродукта, которые при смешивании должны определенным образом менять свою механическую структуру. Это связано с тем, что у нефтепродукта, в частности, у дизтоплива или керосина,  $\epsilon$  не превышает нескольких единиц при наличии очень малых значений  $\sigma$  ( $\sigma \ll 10^{-4}$  См/м). Добавление такого диэлектрика не должно было бы приводить к существенному изменению диэлектрической проницаемости смеси (в эксперименте наблюдалось увеличение  $\epsilon$  на  $10 \dots 15$  ед.).

Рассмотрим одну из возможных гипотез, объясняющих в какой-то мере полученный эффект. При соприкосновении частиц грунта с водой молекулы воды, непосредственно окружающие частицу грунта оказываются прочно связанными с ее поверхностью. Слои прочно связанной воды, в свою очередь, связывают и ориентируют прилегающие к ним молекулы воды. Последние образуют рыхло связанную воду (толщины слоя  $0,25 \div 0,5$  мкм).

Кроме этого, вода в породах грунта может находиться в гигроскопическом состоянии (вода, которая конденсируется на поверхности частиц), а также в качестве пленочной воды, которая образуется на частицах под влиянием молекулярных сил сцепления.

Частицы влажного грунта, имеющие гигроскопическую оболочку, при дальнейшем увлажнении грунта после освобождения всей теплоты смачивания приобретают пленочную воду. В естественном виде частицы сближены между собой так, что пленочный слой не развивается до максимально возможного значения. В углах пор между частицами грунта образуется вода, поверхность которой представляет собой мениск поверхностного натяжения. При дальнейшем увлажнении мениски соприкасаются. В порах остаются просветы, по которым может перемещаться вода или нефтепродукт.

Предположим, что нефтепродукт, попадая в поровое пространство, увеличивает давление внутри пор, переводя воду из пор в свободном состоянии в пленочную воду. Кроме того, под возросшим давлением вода может адсорбироваться на поверхности частиц, переходя из состояния

водяного пара в жидкую фазу, увеличивая оболочку, обволакивающую частицы грунта.

В работе [2] приводятся формулы для расчета электрической поляризуемости двухслойного шара в квазистатическом поле, окруженного средой с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_m$ . Диэлектрическая проницаемость центральной части шара диаметра  $a - \epsilon_2$ , а оболочки с внешним диаметром  $b - \epsilon_1$ .

Будем рассматривать среду, в которой распределены двухслойные включения, описанные выше, и сферические частицы воды различных радиусов  $r_n, n=1,2,\dots,N$ . Такие частицы могут заполнять все пространство между двухслойными частицами, если  $N \rightarrow \infty$ , а последовательность  $\{r_n\}$  является убывающей. Тогда, при условии  $|k_0 r_n \sqrt{\epsilon_1 \mu_1}| \ll 1$ , пользуясь формулами, приведенными в [2], можно рассчитать диэлектрическую проницаемость указанной смеси.

Расчеты выполнены нами для грунта, частицы которого находятся в оболочке воды толщиной  $d$ , свободной воды и нефтепродукта. Средний размер частиц выбирался равным 0,3 мм, диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 5$ . Исследовалась зависимость  $\epsilon$  от толщины  $d$  (от 0 до 60 мкм) при ус-

ловии, что ее увеличение происходит за счет уменьшения влаги, содержащейся в свободном состоянии в рассматриваемой среде. Расчеты показали существенный рост диэлектрической проницаемости от нескольких единиц до 20 и больше при незначительном увеличении удельной проводимости. Это согласуется с приведенными выше экспериментальными зависимостями.

Таким образом, насыщение пород слоев ЗА нефтепродуктами может приводить к существенным изменениям их диэлектрической проницаемости по сравнению с окружающими не загрязненными породами.

#### 4. Структура, влажностный режим и электрические характеристики типовых ЗА

Исследования водного режима грунтов ЗА на Украине, выполненные рядом исследователей [5], позволили следующим образом стратифицировать ЗА по содержанию влаги в порах.

При наличии выдержанной во времени толщи ненасыщенных грунтов ( $ЗА > 8-10$  метров), от поверхности земли до уровня грунтовых вод выделяется четыре достаточно четко различаемых подгоризонта с характерными режимами параметров влагопереноса, которые сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Структура типичной ЗА

Подгоризонт	мощность, м	вариации объемной влажности, %	средняя влажность, %	суточные вариации влажности, %	градиент влажности, %/м
активного влагообмена	0-2,5	8-38	18-20		5-8
переменного увлажнения	4,5	5-28		1-2	<2
транзитного влагопереноса	от 7 до УГВ	<1-2	12-15		<2
Приуровненный подгоризонт	0,5-2	8-60	15-36		5-7

С уменьшением мощности ЗА до 6-8 метров, подгоризонт переменного увлажнения, как правило, плавно переходит в приуровненный, а подгоризонт транзитного влагопереноса отсутствует. При этом несколько увеличивается влажность грунтов зоны аэрации: активного увлажнения до 22 %, приуровненного до 38-40 %.

При дальнейшем уменьшении толщины ЗА (до 3-5 метров) происходит смыкание зоны активного водообмена с приуровненным подгоризонтом. Влажность первого при этом увеличивается в среднем до 33 %, объемная влажность зоны капиллярной каймы составляет в среднем 40 %.

Суммируя данные для различных участков территории Украины, можно сделать вывод о том, что при определении средней по ЗА объемной влажности грунтов можно ориентироваться на следующие значения: для толщины пород ЗА 8 и более метров – 22 %, при мощности ЗА 5-8 метров – 28 % и при мощности ЗА 3-5 метров и менее – 33 %. Следует отметить, что влажность грунтов ЗА имеет тенденцию увеличиваться с ростом содержания глинистых фракций в породах. Уменьшение влажности при переходе из слоя суглинка в слой песка может составлять 6-12 %.

Таким образом, ориентируясь на приведенные выше средние значения объемной влажности и экспериментально полученные зависимости значений диэлектрической проницаемости и удельной проводимости [1], а также экспериментальные зависимости электрических характеристик

пород от влажности [3], можно рекомендовать следующие приведенные в таблице 2 средние значения  $\epsilon$  и  $\sigma$ , которыми можно пользоваться в расчетах применительно к задачам мониторинга слоев ЗА в полосе частот 40...150 МГц.

Таблица 2. Средние значения электрических характеристик суглинка и песка для типичных ЗА.

Мощность ЗА, м	Средняя влажность, %	Относительная диэлектрическая проницаемость		Удельная проводимость, См/м	
		Суглинок	Песок	Суглинок	Песок
8	22	8-12	6-9	0,01-0,02	<0,005
5-8	28	10-18	8-11	0,017-0,03	0,005-0,01
3-5	33	12-21	10-13	0,02-0,04	0,008-0,012

### 5. Оценка радиофизической возможности мониторинга ЗА

Рассмотрим радиолокационное зондирование ЗА по глубине с целью определения границ слоев: суглинок-песок, насыщенный НП суглинок - суглинок с естественной влажностью, насыщенный НП песок - песок с естественной влажностью, с учетом соответствующих размеров неоднородных слоев. Последние выбирались равными полученным в экспериментах размерам переходных слоев, что заведомо приводит к худшим результатам зондирования. Для этого воспользуемся методом вычисления коэффициентов отражения плоской радиоволны от неоднородного слоя с произвольным законом изменения электрических характеристик в нем по глубине, изложенным в [4]. Разобьем неоднородный (с изменяющимися электрическими характеристиками по глубине) слой на  $N$  малых по толщине в сравнении с длиной волны слоев, в пределах которых электрические характеристики являются фиксированными. Коэффициент отражения радиоволны от такого слоя определяется следующим выражением:

$$R = \frac{Z_s - Z_1}{Z_s + Z_1}, \quad (3)$$

где  $Z_s$  - поверхностный импеданс неоднородного слоя,  $Z_1$  - импеданс слоя, из которого падает волна на неоднородный слой.

Вычисление поверхностного импеданса на границе рассматриваемого слоя производится рекуррентно, начиная с последнего от границы  $N$ -го элементарного слоя по формулам:

$$Z_s^{n-1} = \frac{Z_s^n - iZ_{n-1} \operatorname{tg}(k_{n-1}d_{n-1} \cos\theta_{n-1})}{Z_{n-1} - iZ_s^n \operatorname{tg}(k_{n-1}d_{n-1} \cos\theta_{n-1})} Z_{n-1}, \quad (4)$$

где  $\theta_{n-1}$  - угол падения, под которым происходит распространение волны в  $(n-1)$  слое (определяется из закона Снелиуса);  $Z_s^n$  - поверхностный импеданс  $n$ -го слоя,  $Z_{n-1}$  - импеданс  $(n-1)$  слоя;  $d_{n-1}$  - толщина  $(n-1)$  слоя.

Вычисление коэффициентов отражения осуществлялось для границ слоев: суглинок-песок; суглинок, насыщенный НП, - суглинок с естественной влажностью; песок, насыщенный НП, - песок без НП. Толщина неоднородного слоя выбиралась равной 10 см - для песка и 20 см - для суглинка. Результаты расчетов, выполненных по формулам (3)-(4) с учетом экспериментальных данных, полученных в ходе лабораторных исследований и в лизиметре, представлены в таблице 3.

Как видно из таблицы, значения коэффициентов отражения от границ рассмотренных слоев превышают значение коэффициента отражения от границы слоя суглинок при влажности 20 % -

Таблица 3. Коэффициенты отражения от переходных слоев

Название перехода	Влажностные условия	Коэффициент отражения
Суглинок-песок	ЗА 2-го типа	0,3
Суглинок с НП - суглинок без НП	ЗА 1-го типа	0,15
Песок, насыщенный НП, - песок без НП	ЗА 1-го типа	0,13
Суглинок, W=20 %, - суглинок, W=10 %		0,05

суглинок с влажностью 10 %, которая выбрана с учетом превышения существующих градиентов влажности в реальных условиях (см. описание типичных ЗА, приведенное выше), более чем на 6 дБ. Если учесть, что затухание радиоволн рассмотренного диапазона для приведенных средних значений влажности типичных ЗА редко превышает 5÷10 дБ/м для песка и 15÷20 дБ/м для суглинка, то можно сделать вывод о возможности выделения и различения сигналов, соответствующих отражениям от границ рассмотренных слоев.

Таким образом, применение радиофизических методов зондирования может позволить осуществлять мониторинг ЗА с целью обнаружения и картографирования подповерхностных слоев ЗА как в естественном виде, так и при насыщении последних нефтепродуктом в результате загрязнения техногенного характера.

#### Литература

1. Джеки Хипп. ТИИЭР. 1974, **62**, №1, с. 122-127.
2. А.М. Тимошенко, В.И. Пономаренко. РЭ. 1996, **41**, №4, с. 412 - 412.
3. Ю.И. Лещанский, Н.В. Ульянычев. Изв. вузов. Радиофизика. 1980, **23**, №5, с. 530-532.
4. Л.М. Бреховских. Волны в слоистых средах. Москва, АН СССР, 1957.
5. А.Е. Бабинец, А.Б. Ситников, С.П. Джепо, К.Д. Ткаченко. Препринт Инст. геол. наук АН УССР. Киев, 1981, с. 25-28.

#### On Possibility of Radiophysical Monitoring of Upper Earth Subsurface Structure

V. V. Kouzmin, V. G. Sougak

Results of experimental measurements of dependence of dielectric permeability and conductivity of typical ground samples of aeration zone (loam and sand) on humidity and petroleum saturation degree are carried out in the radio-frequency band 40 - 150 MHz in laboratory conditions as well as in lizimeter under natural conditions of their stratification. On the basis of data about depths of the typical aeration zones, average humidity and gradients of its change on depth, stipulated by various types of inhomogeneities the possibility of radiophysical subsurface monitoring with purpose of charting of zones of grounds pollution by petroleum is estimated.