

*Геология*

УДК 550.83

Д. А. ХАЧАТРЯН, М. А. ГРИГОРЯН, Э. Б. АДЖИМАМУДОВ

ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВАХ ПОЧВ И ГРУНТОВ  
СЕВЕРНОГО СКЛОНА ГОРЫ АРАГАЦ

В статье рассматриваются электромагнитные свойства почв и грунтов северного склона г. Арагац. тангенс угла потерь, относительная диэлектрическая проницаемость, эффективное удельное активное и реактивное сопротивление в зависимости от типа пород, влажности и плотности при частотах электромагнитного поля 25, 50, 75, 100 МГц. Измерения проводились резонансным способом с помощью измерителя добротности—куметра. Описывается характер изменений электромагнитных свойств, даются пределы их изменений в зависимости от типа пород, степени увлажнения грунтов, плотности, а также от изменения частоты электромагнитного поля.

Для успешного применения радиоволновых методов электроразведки необходимо изучение электромагнитных свойств пород: удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ), магнитной и диэлектрической проницаемости, которые определяют главные характеристики электромагнитного поля в среде, т. е. волновое число ( $K$ ) и его компоненты—коэффициент поглощения ( $b$ ) и фазовую постоянную ( $a$ ), волновое сопротивление (импеданс) ( $z$ ), тангенс угла потерь ( $tg\sigma$ ) и др.

Нами проводилось изучение электромагнитных свойств почв и грунтов северного склона г. Арагац, представленных глинами, суглинками, супесями, песками, глиной со щебнем и дресвой, щебнем и дресвой с глиняным заполнителем.

Лабораторные измерения резонансным методом [1] проводились в диапазоне радиоволновых частот 25, 50, 75 и 100 МГц с помощью измерителя добротности (куметра) Е-4-5А и специального приспособления, служащего одновременно емкостью для образцов и электрическим датчиком. Измерялись резонансная емкость  $C_1$  и добротность контура  $Q_1$  измерительной аппаратуры без датчика, резонансная емкость  $C_2$  и добротность контура  $Q_2$  с датчиком без образца, резонансная емкость  $C_3$  и добротность контура  $Q_3$ , когда к куметру был подключен датчик с образцом.

Изучалась зависимость электромагнитных свойств от типа породы при различной весовой влажности, а также от плотности образцов. Определения плотности и влажности проводились по методике, описанной в имеющихся руководствах [2, 3].

**Тангенс угла потерь ( $tg\sigma$ )**, характеризующий энергию, теряемую на нагревание среды при создании переменного электромагнитного поля в горных породах, рассчитывался по формуле

$$\operatorname{tg}\sigma = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 \cdot Q_2} \cdot \frac{C_1}{C_1 - C_2}$$

Для воздушно-сухого состояния пород при частоте 100 МГц получены предельные и средние значения тангенса угла потерь, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Тип породы	Кол-во образц.	tgσ		
		min	max	среднее
глина	3	0,1523	0,1750	0,1628
суглинок тяжелый	11	0,1010	0,3900	0,1095
суглинок средний	5	0,0404	0,1190	0,0866
суглинок легкий	9	0,0239	0,0945	0,0444
суглинок пылеватый	8	0,0120	0,0810	0,0421
супесь тяжелая	21	0,0173	0,1280	0,0459
супесь легкая	2	0,0322	0,0356	0,0339
песок мелкий	6	0,0166	0,0880	0,0424
глина со щебнем и дрсевой щебенисто-дресвяный грунт с глинистым и суглинистым заполнителем	11	0,0157	0,1230	0,0533
	8	0,0194	0,0771	0,0480

Как видно из таблицы, имеется слабая дифференциация пород по значению тангенса угла потерь. Максимальным средним значением тангенса угла потерь обладают глины. Малочисленность образцов, однако, не позволяет утверждать это с полной достоверностью. Предельные значения тангенса угла потерь для глин: максимальное—0,1750, минимальное—0,1523.

Суглинки обладают меньшими значениями тангенса угла потерь. Среднее взвешенное значение tgσ для них равно 0,0707. Следует указать, что суглинки тоже дифференцированы по значениям тангенса угла потерь. Среднее значение tgσ для тяжелых суглинков составляет 0,1085, в то время как для пылеватых суглинков оно равняется 0,0421.

Среднее значение тангенса угла потерь для супесей ниже, чем у суглинков, и равняется 0,0445. Примерно такими же значениями характеризуются и мелкие пески.

Для щебенисто-дресвяного грунта с глинистым и суглинистым заполнителем среднее значение тангенса угла потерь равняется 0,0480, а для глин со щебнем и дрсевой—0,0533.

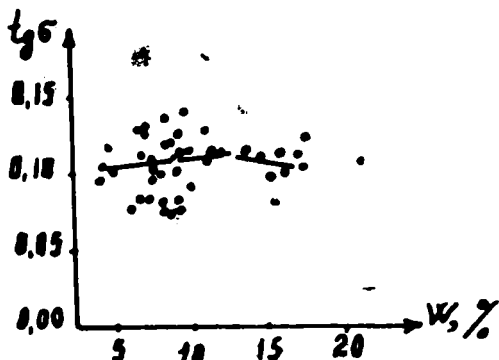


Рис. 1. График зависимости tgσ от влажности при 100 МГц для суглинков.

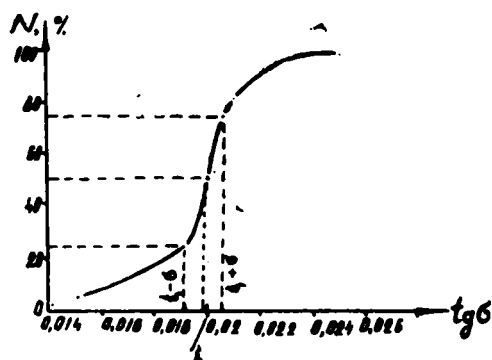


Рис. 2. Кумулятивная кривая распределения tgσ для сухих суглинков при 100 МГц.

Изучение зависимости величины тангенса угла потерь от естественной влажности суглинков при 100 МГц показывает, что с увеличением влажности от 4,5% до 15% значение  $\text{tg}\sigma$  увеличивается от 0,1050 до 0,1120. При влажности пород от 15 до 20% происходит уменьшение значения  $\text{tg}\sigma$  до 0,102 (рис. 1). Как видим, изменение влажности не приводит к существенным изменениям  $\text{tg}\sigma$ .

На рис. 2 приведена кумулятивная кривая распределения тангенса угла потерь сухих\* образцов при частоте электромагнитного поля 100 МГц. Как видно из графика, центр распределения  $\text{tg}\sigma$  равняется 0,02 при стандартном отклонении 0,008. Опыты были проведены на 38 образцах. Количество образцов, а также характер распределения значений  $\text{tg}\sigma$  позволяет утверждать, что для сухих суглинков вероятное значение тангенса угла потерь равняется 0,02.

Искусственное увеличение влажности сухих образцов до 20% приводит к возрастанию значения тангенса угла потерь до 0,074, при дальнейшем увеличении влажности до 30—40%, значение тангенса угла потерь уменьшается соответственно до 0,6170 и 0,0580 (рис. 3).

Как видно из того же рис. 3, уменьшение частоты приводит к возрастанию значения  $\text{tg}\sigma$ , за исключением частоты 100 МГц, для которой закономерность нарушается.

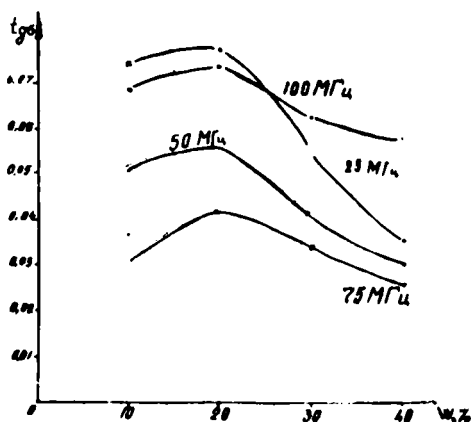


Рис. 3. Графики зависимости  $\text{tg}\sigma$  от влажности при частотах 25, 50, 75 и 100 МГц.

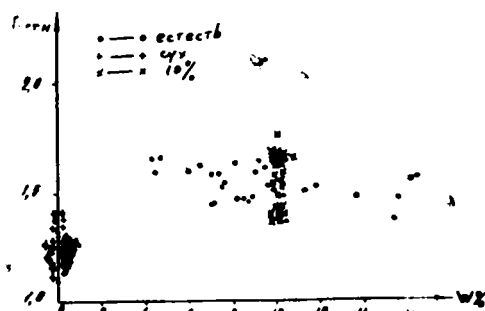


Рис. 4. Характер изменения  $\epsilon_{\text{отн}}$  суглинков от влажности.

**Диэлектрическая проницаемость.** Значение относительной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon_{\text{отн}}$ ) рассчитывалась по формуле

$$\epsilon_{\text{отн}} = \frac{C_1 - C_2}{(C_1 - C_2)(1 + \text{tg}^2\sigma)}$$

Анализ значений диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ), полученных при частоте 100 МГц для почв и грунтов в воздушно-сухом состоянии, показывает следующее.

Наибольшими значениями  $\epsilon_{\text{отн}}$  обладают глинистые породы. Для глины оно равняется 2,45, а для пылеватых глин—1,82. Значения  $\epsilon_{\text{отн}}$  для тяжелых и средних суглинков примерно равны—среднее значение сос-

\* Высушивание проводилось при температуре 110°C по методике, описанной в [3].

тавляет 1,77. Значения  $\epsilon_{отн}$  для легких и пылеватых суглинков несколько ниже, чем у тяжелых и средних суглинков и составляют в среднем соответственно 1,49 и 1,58. Значения  $\epsilon_{отн}$  для супесей различного типа мало отличаются друг от друга и колеблются от 1,58 у пылеватых до 1,60 у тяжелых супесей. Среднее значение  $\epsilon_{отн}$  для мелких песков равняется 1,65. Примерно такое же среднее значение характерно и для щебенисто-дресвяных грунтов с глинистыми и суглинистыми заполнителями.

На рис. 4 приведен характер изменения  $\epsilon_{отн}$  от влажности для суглинков. Значение  $\epsilon_{отн}$  для сухих образцов колеблется от 1,05 до 1,42 при частоте 100 МГц. Как видно из графика, естественная влажность образцов изменяется от 4 до 15 и более процентов, при этом заметного изменения значения  $\epsilon_{отн}$  от влажности не наблюдается. Однако следует заметить, что у сухого образца значение  $\epsilon_{отн}$  всегда меньше, чем у того же образца при естественной влажности.

Значение  $\epsilon_{отн}$  при весовой влажности образцов 10% изменяется от 1,38 до 1,7 единиц. Как видно из рис. 5, кумулятивные кривые  $\epsilon_{отн}$  суглинков близки к кривым нормального распределения. Среднее значение  $\epsilon_{отн}$  (центр распределения) для сухих образцов равняется 1,185, а для образцов с естественной и десятипроцентной влажностью, примерно—1,52. Среднеквадратичное (стандартное) отклонение для сухих образцов  $\sigma_1=0,035$ , для образцов с естественной влажностью— $\sigma_2=0,05$ , а для образцов с влажностью 10%— $\sigma_3=0,09$ .

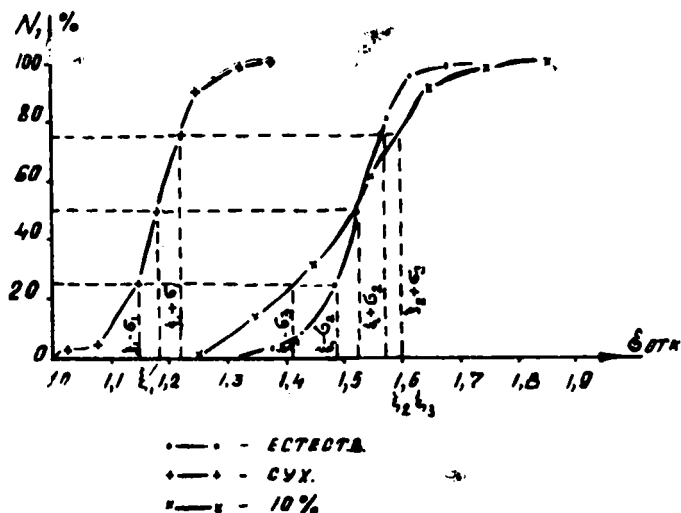


Рис. 5. Кривые распределения  $\epsilon_{отн}$  суглинков при естественной, нулевой и десятипроцентной весовой (искусственной) влажности.

Изучение зависимости  $\epsilon_{отн}$  от влажности было проведено на образцах суглинков и супесей. Среднее значение  $\epsilon_{отн}$  для супесей возрастало следующим образом: 1,36; 1,60; 2,05; 2,30 при влажности 0%, 10%, 30% и 40% соответственно.

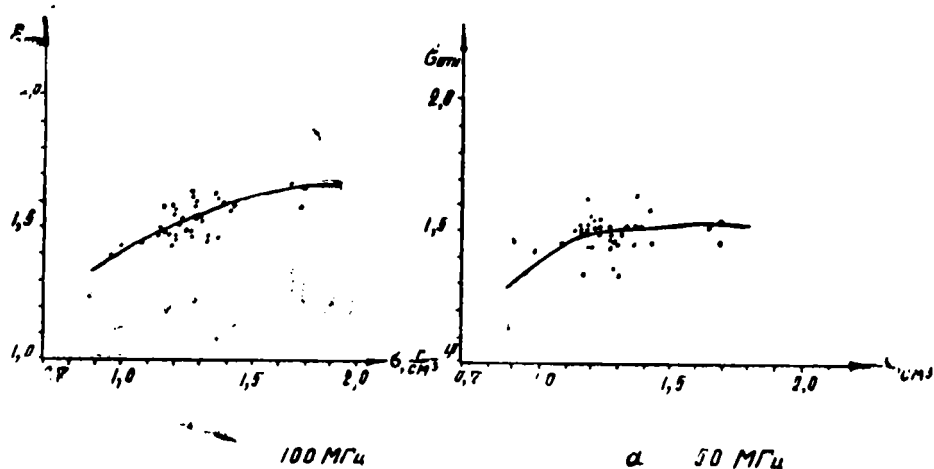


Рис. 6. Графики зависимости  $\epsilon_{\text{отн}}$  от плотности для суглинков при естественной влажности.

На рис. 6 приведена зависимость  $\epsilon_{\text{отн}}$  от плотности образца для суглинков при их естественном увлажнении. Как видно из графиков, наблюдается некоторая связь между вышеупомянутыми параметрами: увеличение плотности от 0,9 до 1,7 г/см<sup>3</sup> приводит к увеличению значения  $\epsilon_{\text{отн}}$  от 1,24 до 1,66 единиц при 100 МГц и от 1,30 до 1,52 при 50 МГц.

Значения *активного и реактивного сопротивлений* рассчитаны по следующим формулам:

$$R = \frac{1.59 \cdot 10^8 \cdot Q_2 \cdot Q_3}{f C_1 (Q_2 - Q_3)}; \quad X = \frac{1.59 \cdot 10^8}{f (C_1 - C_2)},$$

где  $R$ —активное, а  $X$ —реактивное сопротивление в омах,  $f$ —частота в килогерцах.

Величины  $R$  и  $X$  зависят от объема образца и не характеризуют породу, поэтому нами рассчитывалось эффективное удельное сопротивление по следующим формулам:

$$\rho_{R\text{эфф}} = kR; \quad \rho_{X\text{эфф}} = kX,$$

где  $k$ —коэффициент приспособления, определенный в лабораторных условиях.

Отметим, что во всех случаях  $C_1 > C_2$  и  $C_1 > C_3$ . Это свидетельствует о том, что горные породы обладают емкостным реактивным сопротивлением. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, значения эффективного удельного электрического сопротивления ( $\rho_{R\text{эфф}}$ ) образцов с естественной влажностью при частоте 100 МГц колеблются в пределах первых десятков ома. Значения эффективного реактивного удельного электрического сопротивления ( $\rho_{X\text{эфф}}$ ) значительно ниже, чем активного, и изменяются от 2,7 до 3,9 Ом·м со средним значением 3,5 Ом·м.

Эффективное активное и реактивное удельное электрическое сопротивление сухих образцов значительно выше, чем при естественной влажности. Минимальное эффективное активное удельное электрическое со-

Таблица 2

Состояние образцов суглинков	Колич. образцов	$R_{эфф}$			$R_{эфф}$		
		$R_{Rmin}$	$R_{Rmax}$	$R_{Rсредн}$	$R_{Xmin}$	$R_{Xmax}$	$R_{Xсредн}$
50 МГц							
естественное воздушно-сухое	22	20,0	30,5	25,0	5,4	7,9	6,8
сухое при 10% влажности (искусственной)	19	555,0	3850,0	1525,0	8,7	492,0	49,0
	15	1,0	19,0	11,7	1,7	7,9	5,4
100 МГц							
естественное воздушно-сухое	21	11,5	18,9	16,2	2,7	3,9	3,5
сухое при 10% влажности (искусственной)	20	350,0	5550,0	928,0	5,4	9,7	7,5
	16	1,0	12,5	7,6	1,8	3,4	2,7

противление равняется 350 Ом·м, максимальное—5550 Ом·м со средним значением 928 Ом·м. Реактивное эффективное удельное электрическое сопротивление изменяется от 5,4 до 9,7 Ом·м со средним значением 7,5 Ом·м.

Образцы с искусственной влажностью (10%) обладают меньшими эффективными удельными электрическими сопротивлениями, чем в первых двух случаях. Активное эффективное удельное электрическое сопротивление изменяется от 1,0 до 12,5 Ом·м со средним значением 7,6 Ом·м, а реактивное эффективное удельное электрическое сопротивление—от 1,8 до 3,4 Ом·м со средним значением 2,7 Ом·м.

Во всех случаях активное эффективное сопротивление образцов с естественной влажностью всегда больше, чем при десятипроцентной искусственной влажности, несмотря на то, что естественная влажность у образцов изменяется от 4 до 16%. Это можно объяснить тем, что часть влаги, содержащейся в естественных образцах, находится в прочносвязанном адсорбционном состоянии, а электропроводность у этих образцов в основном обусловлена свободной поровой влагой. Электропроводность при искусственной влажности образцов обусловлена всей содержащейся в них влагой, поэтому и эффективное активное удельное электрическое сопротивление меньше, чем при естественной влажности.

Эффективное реактивное удельное электрическое сопротивление образцов зависит от количества содержащейся влаги как при естественной, так и при искусственной влажности.

У тех образцов, естественная влажность которых больше, чем 10%, эффективное реактивное удельное электрическое сопротивление меньше, чем при десятипроцентной искусственной влажности, а если естественная влажность меньше, чем 10%, то эффективное удельное реактивное сопротивление больше, чем при десятипроцентной искусственной влажности.

Результаты расчетов при 50 МГц показывают, что во всех случаях эффективное активное и реактивное удельное электрическое сопротивление больше, чем соответствующее эффективное сопротивление, полученное при 100 МГц, причем отношение для эффективных активных удельных электрических сопротивлений составляет примерно 1,5—1,6; для эффективных реактивных удельных сопротивлений при естественной и де-

сятипроцентной искусственной влажности—примерно 2,0, а для сухих образцов—6,5.

Характер изменения эффективных активных удельных и реактивных удельных сопротивлений в зависимости от влажности при 50 МГц в остальном схож с поведением этих же параметров при 100 МГц.

Уменьшение значений эффективных удельных электрических сопротивлений с возрастанием частоты объясняется резонансными явлениями, инерционностью поляризации молекул, объемной поляризацией, которые обуславливают частотную дисперсию не только эффективных удельных электрических сопротивлений, но и тангенса угла потерь и диэлектрической проницаемости [1].

Полученные значения позволяют вычислять коэффициент поглощения, модуль численного расстояния, длину волн и другие электромагнитные характеристики почв и грунтов северного склона г. Арагац.

*Кафедрա ցեոֆիզիկական մեթոդների  
 փոսկոյի և բերքի տեղանշանների  
 բնական յայտարարումներ*

*Ստացւում է 7.09.1982*

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Хмелевской В. К. Основной курс электроразведки. М.: Изд-во МГУ, 1971, ч. II.
2. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. (Справочник геофизика). М.: Недра, 1976.
3. Методическое руководство по определению физических свойств горных пород и полезных ископаемых. М.: Госгеолтехиздат, 1962.

**Գ. Ա. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Մ. Ա. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Է. Բ. ՀԱԶԻՄԱՄՈՒԿՈՎ**

**ԱՐԱԳԱՄ ԼՅՈՒՆ ՀՅՈՒՍԻՍԱՑԻՆ ԼԱՆՋԻ ԳԵՏՆԱՀՈՂԵՐԻ ԷԼԵԿՏՐԱՄԱԳՆԵՍԱԿԱՆ  
 ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՄԱՍԻՆ**

**Ա մ փ ա փ ու մ**

Երբ նմուշների բնական խոնավության փոփոխությունը 4—15%-ի սահմաններում է, 100 ՄՀց դաշտ կիրառելիս, կավերի կորստի անկյան տանգենսի արժեքը բարձր է և հասնում է 0,1750-ի, կավավազների հավասար է 0,0911, ավազակավերինը՝ 0,0445, խճակավերինը կավային և կավավազային լցուկով՝ 0,0480: Խոնավության պարունակության մեծացումը հանգեցնում է կորստի անկյան տանգենսի արժեքի մեծացմանը:

Չափումները 25,50,75 ՄՀց հաճախականությունների դեպքում ցույց են տալիս, որ հաճախականության փոքրացումը հանգեցնում է էցժ արժեքի մեծացմանը:

Կավերի հարաբերական դիէլեկտրիկ թափանցելիության արժեքը նույնպես մեծ է և հասնում է 1,82—1,77; ավազակավերինը՝ 1,58—1,60; ավազներինը՝ 1,65 և այլն:

Բնական խոնավության փոփոխությունը 4—15%-ի սահմաններում ավազակավերի  $\epsilon_{\text{ср}}$ -ի արժեքի նշանակալի փոփոխության չի հանգեցնում:

Օրբ դաշտի հաճախականությունը հավասար է 100 ՄՀց, նմուշների բնական խոնավության դեպքում կավավազների  $\rho_{\text{к էֆ}}$ -ի արժեքը փոփոխվում է 11,5—18,9 Օհմ.մ 110—120°C ջերմաստիճանում, շորացնելուց հետո՝ 350—5550 Օհմ.մ, իսկ շոր ապարները արհեստականորեն 10% խոնավացնելու դեպքում՝ 1,0—12,5 Օհմ.մ սահմաններում:  $\rho_{\text{x էֆ}}$ -ը համապատասխանաբար փոփոխվում 2,7—3,9; 5,4—9,7; 1,8—3,4 Օհմ.մ սահմաններում: