

УДК 621.371+631.4

## ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И РАДИОИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СОЛЕВОЙ КОРКИ СОРОВОГО СОЛОНЧАКА

© 2019 г. А. Н. Романов<sup>1</sup>, \*<sup>1</sup>Институт водных и экологических проблем СО РАН, Россия, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1

\*e-mail: romanov\_alt@mail.ru

Поступила в редакцию 28.02.2017 г.

После доработки 31.05.2018 г.

Принята к публикации 26.09.2018 г.

Использование дистанционных микроволновых методов мониторинга засоленных почв ограничено слабой изученностью диэлектрических и радиоизлучательных характеристик солевой корки, образующейся на поверхности солончаков. Приведены результаты комплексных исследований по оценке суточных вариаций действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости сорového солончака (Sodic Gleyic Solonchak). Образцы солевой корки солончака отбирали в летний период в Алтайском крае на территории Кулундинской степи с участка площадью  $2 \times 2$  м в течение 34 ч с периодичностью 1 ч. В лабораторных условиях измеряли их диэлектрические характеристики, определяли влажность, плотность, делали химический анализ водной вытяжки. Лабораторные измерения диэлектрических параметров солончака проводили методом мостовых схем на частоте 1,41 ГГц при контроле температуры в диапазоне 265–320 К и влажности в диапазоне 0–0,50 см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>. Получена зависимость объемной влажности солончака от коэффициента излучения, которая может быть использована для оценки засоленности почвы по данным дистанционного зондирования в микроволновом диапазоне. Изучено влияние температуры на диэлектрические и радиоизлучательные характеристики солончака. На зависимостях коэффициента излучения от температуры выделяются интервалы с разным поведением радиоизлучательных характеристик. Для каждого интервала установлены линейные зависимости коэффициента излучения солончака от температуры. Выявлены суточные вариации радиоизлучательных характеристик поверхности солончака. Показано, что радиоизлучательные характеристики солончака зависят от соотношения между температурой, влажностью и засоленностью. Изученные закономерности микроволнового излучения солончаков могут быть использованы при разработке методов радиофизического мониторинга засоленных почв.

**Ключевые слова:** комплексная диэлектрическая проницаемость, коэффициент излучения, микроволновый диапазон, засоленные почвы, минерализация, почвенный раствор

**DOI:** 10.1134/S0032180X19020126

### ВВЕДЕНИЕ

Засоление почв наблюдается в региональном и глобальном масштабах. Площади, занятые засоленными почвами, исчисляются миллионами гектар [4, 6, 11, 13]. Засоление способствует снижению биологической продуктивности почв, что является угрозой продовольственной безопасности многих стран, где имеются засоленные почвы. Данная проблема актуальна для многих регионов Российской Федерации [1, 3, 6, 10], в частности Алтайского края, Новосибирской и Омской областей, где значительное количество почв засолено.

Ветровой перенос минеральных солей с поверхности соляных кор, солончаков, днищ высохших высокоминерализованных озер, миграция химических элементов с водным потоком (реки, ручьи), грунтовыми водами способствуют

накоплению токсичных солей в незасоленных почвах и пресных озерах. В свою очередь это может привести к деградации растительности, активизации процессов опустынивания территорий и оказать влияние на мезоклимат, динамику и свойства приземного слоя атмосферы [22, 27, 28]. Действенный мониторинг этих процессов и прогнозная оценка сценариев их дальнейшего развития возможны с использованием оперативных методов дистанционного зондирования [16].

Для обнаружения и картографирования засоленных почв используются аэрофотоснимки, видеоизображения, мультиспектральные и гиперспектральные данные, получаемые со спутников. Оптические методы дистанционной диагностики засоленных почв, применяемые в промышленных масштабах, основаны на дешифрировании

состояния растений по плотности фототона и вегетационным индексам. Результаты дистанционного зондирования подстилающей поверхности со спутников Landstat TM и Spot используют для выявления и картографирования участков почвенного засоления [18, 24]. Засоленность почв оценивается по данным дистанционного гиперспектрального зондирования и наземных измерений электропроводности почвы на тестовых участках [23, 30]. Использование данных дистанционного зондирования, методов имитационного моделирования и результатов геофизических исследований позволяет различать почвы с разным уровнем засоления, а также выявить направленность процессов засоления—рассоления [19]. Пространственная изменчивость влажности и засоленности почвы может быть рассчитана на основе совместного использования радиолокационных изображений и результатов контактных измерений электропроводности почвы [20]. Предложен алгоритм определения засоленности почвы по значениям мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости [17].

Применение данных дистанционного микроволнового зондирования для картографирования территорий, подверженных процессам почвенного засоления, основано на отличии диэлектрических и радиоизлучательных характеристик засоленных и незасоленных почв. Ограничения по практическому использованию микроволновых методов связаны с пространственно-временными вариациями влажности и засоленности, влиянием растительного слоя, экранирующего микроволновое излучение почвы. Помимо этого радиоизлучательные характеристики засоленных почв могут совпадать с радиоизлучательными характеристиками других типов подстилающей поверхности. Это затрудняет интерпретацию микроволновых данных, снижает вероятность правильного распознавания засоленных почв и не позволяет классифицировать их по степени засоленности и типу засоления почв. Временные вариации засоленности почвы могут быть оценены по данным дистанционного зондирования в оптическом и микроволновом диапазонах [25].

Радиоизлучательные характеристики засоленных почв, особенно солончаков, широко распространены в аридных и полуаридных зонах, занимающих территории до десятков и сотен квадратных километров, зависят от совокупного влияния температуры, влажности, засоленности и в течение суток могут изменяться в широком диапазоне. Для правильной интерпретации данных микроволнового дистанционного зондирования необходимо знать пространственно-временную изменчивость радиоизлучательных характеристик солончаков. Наибольшее влияние на микроволновое излучение солончака оказывает солевая корка на его поверхности, толщина которой сравнима с

толщиной скин-слоя, зависящей от диэлектрических характеристик засоленного грунта.

В настоящей работе приведено сопоставление контактных измерений температуры, объемной доли воды в засоленной почве, минерализации почвенного раствора в солевой корке сорового солончака (Puffic Solonchak (WRB, 2006); Puffic Solonchak Aridic (FAO, 1988); Sodic Gleyic Solonchak (WRB, 2014)) с диэлектрическими и радиоизлучательными характеристиками, измеренными в лабораторных условиях.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в летний период на территории Кулундинской степи, находящейся на юге Западной Сибири. По климатическим условиям вся территория относится к засушливой зоне с годовой суммой осадков 230–260 мм. В качестве объекта исследования был выбран высохший участок бессточного содового озера Петухово с координатами 52°6′53.02″ N, 79°10′16.60″ E. Отбор образцов засоленного грунта производили в течение трех суток после выпадения атмосферных осадков. Во время полевых измерений атмосферные осадки отсутствовали.

На исследуемом участке площадью 2 × 2 м в течение 34 ч с периодичностью 1 ч отбирали образцы засоленного грунта с поверхностного слоя 0–2 см для измерения в лабораторных условиях диэлектрических характеристик, определения влажности и химического анализа водной вытяжки. Температуру почвы измеряли на глубине 1 см ртутным термометром ТМ-10. Суточные температуры почвы в слое 0–1 см изменялись от 286 в ночные часы до 318 К в дневное время. Грунтовые воды залегают на глубине 0.4 м. По гранулометрическому составу почвы легкоглинистые, содержание физической глины (частиц < 10 мкм) 45–49%.

Для количественного описания содержащейся в образцах воды использовали объемную ( $W_V = V_w/V$  [см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>]) и массовую ( $W_M = M_w/M$  [г/г]) доли, связанные между собой отношением  $W_V = (\rho/\rho_w) W_M$ , где  $V$ ,  $V_w$  – объемы почвы и жидкой фазы,  $M = M_{\text{сух}} + M_w$  – масса влажного почвенного образца,  $M_{\text{сух}}$ ,  $M_w$  – массы сухой почвы и воды,  $\rho$ ,  $\rho_w = 1$  г/см<sup>3</sup> – плотность почвы в естественном сложении и воды. Плотность почвы в естественном сложении и сухом состоянии контролировали буровым методом путем отбора почвенного образца в натуральных условиях в емкость объемом 3.7 см<sup>3</sup>.

Массовая доля соли в сухом образце, определенная по формуле  $W_{\text{соли}} = M_{\text{соли}}/M_{\text{сух}}$ , где  $M_{\text{соли}}$  – масса соли в первой водной вытяжке (при соотношении почвы и воды 1 : 5 [3]), составила 0.336 г/г.

По данным анализа химического состава водной вытяжки установлено, что в почвенном растворе присутствуют в больших количествах кар-

**Таблица 1.** Результаты химического анализа водной вытяжки из почв, мг/кг

Время отбора	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Сумма солей
31.07 05:00	45000	107970	16086	2288	<10	144	86601	44.3	0.6	258089.0
09:00	37200	83570	20006	632.8	80	24	74554.9	15.4	0.7	216067.7
11:00	45600	104920	19761	572.6	160	24	88647.7	23.6	0.8	259685.3
14:00	50100	120475	21686	805.8	100	12	99878.5	25.7	0.2	293057.4
18:50	75600	154025	<35.5	1197.1	160	24	118673.1	57.7	<0.1	349679.3
22:00	61500	146095	30821	948.8	100	36	124578	17.4	<0.1	364078.9
01.08 04:00	82800	201910	37786	4470	<10	144	166307	39.6	0.5	493417.0
10:00	87000	193370	32186	4854	<10	144	162811	35.5	0.5	480365.0
11:00	62700	157685	26586	3500	<10	132	126420	28.5	0.4	377022.0
12:00	46200	121085	23961	4538	<10	120	98765	35.2	0.4	294669.0
13:00	33300	85705	9611	2160	<10	108	64989	18.1	0.3	195873.0

Примечание. Использованные методы химического анализа: ГОСТ 26424-85 “Почвы. Метод определения ионов карбоната и бикарбоната в водной вытяжке”; ГОСТ 26425-85 “Почвы. Методы определения иона хлорида в водной вытяжке”; ГОСТ 26426-85 “Почвы. Методы определения иона сульфата в водной вытяжке”; ГОСТ 26428-85 “Почвы. Методы определения кальция и магния в водной вытяжке”; ГОСТ 26423-85 “Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки”; ПНД Ф 16.1:2.2:2.3.51-08 “Методика выполнения измерений массовой доли нитритного азота в почвах, грунтах, донных отложениях, илах, отходах производства и потребления фотометрическим методом с реактивом Грисса”. М., 2008; ГОСТ 26489-85 “Почвы. Определение обменного аммония по методу ЦИНАО”; ПНД Ф 16.1:2.2:2.3.67-10. “Методика измерений массовой доли азота нитратов в пробах почв, грунтов, донных отложений, илов, отходов производства и потребления фотометрическим методом с салициловой кислотой”. М., 2010. Натрий рассчитывался по разности сумм анионов и катионов.

бонаты, сульфаты, хлориды и натрий, магний, кальций (табл. 1). Поэтому вероятно отложение на поверхность солончака следующих минеральных солей Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub>, MgCl<sub>2</sub> и их кристаллогидратов Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> · 10H<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> · 10H<sub>2</sub>O, MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O, MgCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O. Высокогигроскопичная соль CaCl<sub>2</sub> может находиться в почве в растворенном виде, кратковременно выкристаллизовываясь на поверхности засоленной почвы при высоких температурах окружающей среды, превышающих температуру плавления кристаллогидратов CaCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O.

Влажность и температура оказывают влияние на концентрацию почвенного покрова, диффузию, реакции обмена между раствором и твердой фазой [5]. За время эксперимента объемная доля воды в засоленной почве ( $W_v$ ) изменялась в пределах 0.30–0.69 см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>, сумма солей ( $Z$ ) в почве в поверхностном слое 0–3 см, определенная на сухую почву и выраженная в [г/г], изменялась в пределах 0.25–0.5 г/г. Сумма солей в слое почвы 0–1 см достигала 0.6–0.8 г/г.

В лабораторных условиях исследовали диэлектрические характеристики засоленных почв на частоте 1.41 ГГц. На этой частоте наблюдается значительное влияние растворенных минеральных солей на диэлектрические характеристики почвенного раствора. Применение микроволновых радиометров, работающих на данной частоте (в частности на спутнике SMOS (ESA)), позволяет использовать полученные данные при разработке дистанционных микроволновых методов диагностики засоленных почв.

На лабораторной установке мостового типа (рис. 1), созданной на основе измерителя разности фаз ФК2-18, измеряли модуль  $|A|$  и фазу  $\varphi$  комплексного коэффициента прохождения электромагнитной волны через образец засоленной почвы, помещенный в измерительный контейнер (коаксиальный волновод объемом 3.7 см<sup>3</sup>). Обоснование выбора метода мостовых схем для решения электродинамической задачи о прохождении электромагнитной волны через слой диэлектрика, описание использованной аппаратуры, методика расчета диэлектрических и радиоизлучательных характеристик образцов, а также оценочные значения возникающих погрешностей подробно описаны в работе [7].

Перед измерением каждый образец измельчали и тщательно перемешивали до однородного состояния. В зависимости от влажности грунта и его набивки в измерительный контейнер массы исследуемых образцов составляли 3.3–5.5 г, плотности влажной почвы и плотности сухого сложения составляли соответственно  $\rho_{вл} \approx 0.9–1.5$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho_{сух} \approx 0.6–1.09$  г/см<sup>3</sup>. Различие массы и плотности исследованных образцов учитывали при обработке результатов диэлектрических измерений. Увлажнение образцов производили дистиллированной водой.

Для описания диэлектрических и радиоизлучательных характеристик жидкостей используются комплексная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = \epsilon' + i\epsilon''$ , комплексный показатель преломления  $N = \sqrt{\epsilon} = n + ik$ , где  $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$  – действительная и мнимая части комплексной диэлектрической про-

нищаемости,  $n$ ,  $\kappa$  – показатели преломления и поглощения, связанные соотношениями [7]:

$$\varepsilon' = n^2 - \kappa^2, \quad (1)$$

$$\varepsilon'' = 2n\kappa, \quad (2)$$

а также коэффициент излучения  $\chi$ , связанный с  $n$  и  $\kappa$  соотношением:

$$\chi = \frac{4n}{(n+1)^2 + \kappa^2}. \quad (3)$$

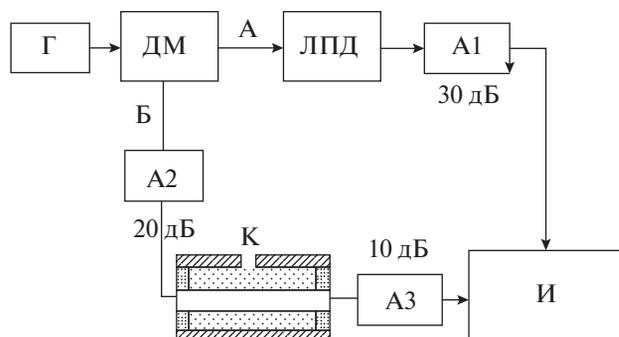
Лабораторная установка представлена на рис. 1. Процесс измерений заключался в следующем. С помощью делителя мощности выполняли балансировку мостовой схемы, в плечо которой устанавливался пустой измерительный контейнер. Сигнал от генератора подавался на делитель мощности и делился поровну между опорным и измерительным каналами. На фазометре устанавливали начальные значения разности фаз и ослабления, соответствующие незаполненному контейнеру. Затем контейнер заполняли исследуемым образцом и по индикатору ФК2-18 отсчитывали значения  $|A|$  и  $\varphi$ .

Интерпретирующие формулы, служащие для расчета диэлектрических и радиоизлучательных параметров по результатам измерений в мостовых схемах, получаются из решения электродинамической задачи о прохождении электромагнитной волны через слой диэлектрика конечной толщины, помещенного в однородную регулярную линию передачи [7].

Технические характеристики установки: диапазон однозначных измерений фазы  $\pm 180^\circ$  (абсолютная погрешность  $2^\circ$ ); диапазон измерения ослабления от 0 до 60 дБ; абсолютная погрешность 0.5 дБ.

**Методика измерения диэлектрических характеристик засоленных почв при разных значениях влажности.** Перед измерением диэлектрических характеристик исследуемые образцы выдерживали в сушильном шкафу при температуре 378 К до постоянной массы. Сразу после высушивания первый образец, не успевший насытиться атмосферной влагой, закладывали в контейнер и измеряли его диэлектрические характеристики, соответствующие нулевой влажности. В оставшиеся высушенные образцы добавляли определенное количество дистиллированной воды для получения требуемой влажности. Приготовленные образцы тщательно перемешивали, закладывали в герметизированные боксы и выдерживали в них не менее 2 ч для того, чтобы вода равномерно распределилась по засоленному грунту, и завершились возможные процессы гидратации минеральных солей при их взаимодействии с почвенной водой.

Значение  $W$  определяли гравиметрическим способом, основанном на высушивании и взвешивании исследуемых образцов. Для этого обра-



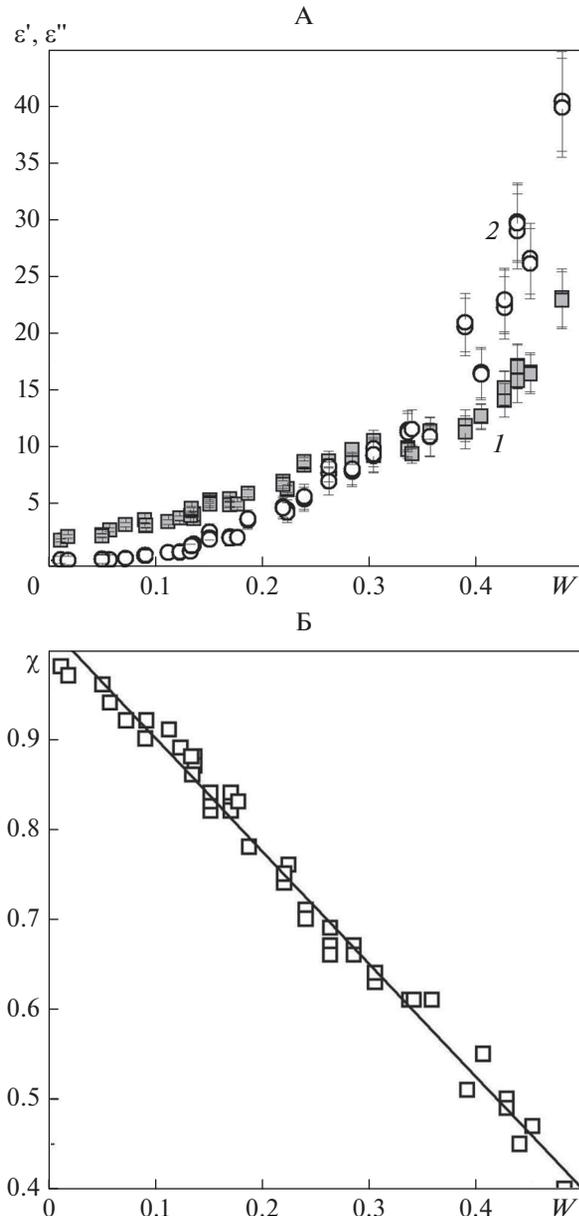
**Рис. 1.** Блок-схема лабораторной установки мостового типа на основе измерителя фаз ФК2-18: Г – генератор сигналов высокочастотный Г4-76, ДМ – делитель мощности согласованный, ЛПД – линия переменной длины, А1, А2, А3 – согласующие коаксиальные аттенюаторы, И – измерительный блок фазометра, К – контейнер для образца, А и Б – опорный и измерительный каналы.

зец помещали в сушильный шкаф и выдерживали в течение 8–24 ч при температуре 378 К, после чего взвешивали на аналитических весах с точностью до 0.001 г. Высушивание продолжали до постоянной массы исследуемого образца. Измерения диэлектрических параметров засоленного грунта производили при температуре  $297 \pm 1$  К.

**Методика измерения диэлектрических характеристик влажных засоленных почв при разных температурах.** Использовали образцы засоленного грунта с той же влажностью, которая была на момент отбора проб. Образцы измельчали до однородного состояния, закладывали в измерительный контейнер, после чего помещали в термостат и замораживали при температуре 265 К. Измерения диэлектрических характеристик исследуемых образцов проводили в процессе постепенного повышения температуры термостата до 318 К. Выбор максимального значения температуры обусловлен тем, что до такой температуры прогревалась поверхность солончака во время полевых исследований.

Измерения температуры производили электронным термометром с погрешностью не более 0.5 К. После диэлектрических измерений образец извлекали из контейнера, взвешивали на аналитических весах с погрешностью не более 0.0001 г, после чего помещали в сушильный шкаф и высушивали до постоянной массы. По измеренным значениям массы влажного и высушенного образцов и известному объему контейнера рассчитывали объемную влажность засоленного образца.

Во время эксперимента в натуральных условиях объемная доля воды в засоленной почве в поверхностном слое солончака изменялась от  $W_V = 0.69$  (сильно увлажненная почва) до 0.06 (сухая почва). Значения скин-слоя засоленной почвы, рассчитанные по данным предварительных лабораторных измерений диэлектрических характери-



**Рис. 2.** Зависимости действительной (1) и мнимой (2) частей комплексной диэлектрической проницаемости (А), коэффициента излучения ( $\chi$ ) (Б) солевой корки солончака от объемной доли воды в засоленной почве ( $W_V$ ).

стик на частоте 1.41 ГГц, в диапазоне изменения объемной влажности в природных условиях ( $W = 0.69\text{--}0.06 \text{ см}^3/\text{см}^3$ ) составили 0.4–1.2 см. Исходя из этого, отбор проб засоленной почвы проводили в слое 0–2 см. Диэлектрические характеристики образцов измеряли в интервале температур от 265 до 318 К.

Экспериментальные данные об изменениях диэлектрических характеристик при вариациях температуры и объемной влажности аппроксимировали непрерывными зависимостями с помощью программы Origin 6.1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Влияние объемной влажности.** Влияние объемной влажности на диэлектрические и радиоизлучательные свойства засоленной почвы исследовали на частоте 1.41 ГГц в диапазоне  $W_V = 0\text{--}0.49 \text{ см}^3/\text{см}^3$  при температуре 297 К. На рис. 2а приведены значения  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$ , измеренные при разных значениях  $W_V$ . Видно, что при увеличении  $W_V$  значения  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  возрастают, причем скорости возрастания  $\frac{d\epsilon'}{dW_V}$  и  $\frac{d\epsilon''}{dW_V}$  в разных интервалах влажности существенно различаются. Так, в интервале  $W_V = 0\text{--}0.17 \text{ см}^3/\text{см}^3$   $\frac{d\epsilon'}{dW_V} \approx 21.2$ ,  $\frac{d\epsilon''}{dW_V} \approx 14.7$ , а в интервале  $0.30\text{--}0.49 \text{ см}^3/\text{см}^3$ ,  $\frac{d\epsilon'}{dW_V} \approx 73$ ,  $\frac{d\epsilon''}{dW_V} \approx 153$ . Подобное поведение диэлектрических характеристик солончака связано с влиянием ионной проводимости, зависящей от количества солей, растворенных в почвенной влаге.

По данным диэлектрических измерений почвенных образцов с разной объемной влажностью рассчитывали коэффициент излучения  $\chi$ . Приведенная на рис. 2Б линейная зависимость  $\chi(W_V)$ , аппроксимированная методом наименьших квадратов с помощью программы Origin 6.1, имеет вид

$$\chi = (1.0 \pm 0.005) - (1.25 \pm 0.018)W_V, \quad (4)$$

$$R = -0.994, \sigma = 0.019, p < 0.0001,$$

где  $R$ ,  $\sigma$  – коэффициент корреляции и стандартное отклонения для  $\chi$ .

Полученная аналогичным способом линейная зависимость  $W(\chi)$  имеет вид

$$W_V = (0.811 \pm 0.0085) - (0.79 \pm 0.01)\chi, \quad (5)$$

$$R = -0.994, \sigma = 0.015.$$

Соотношения (4) и (5), полученные при температуре 223–296 К, справедливы как для случая неполного растворения минеральных солей в почвенной влаге, так и случая почвенного раствора с концентрацией солей меньшей, концентрации насыщенного раствора.

**Влияние температуры.** Известно, что в интервале температур от 223 до 296 К сухие почвы температурной дисперсии диэлектрических характеристик не имеют. Для влажных почв наблюдается дисперсия диэлектрических параметров, зависящая от почвенной влажности [2, 8, 21], а также от объемных долей свободной и связанной воды, диэлектрические характеристики которых различаются [14, 29]. Влияние температуры на диэлектрические характеристики влажных засоленных почв связано с изменением ионной проводимости, вклад которой в диэлектрическое поведение смеси зависит как от минерализации почвенного раствора, так и от его температуры.

Таблица 2. Зависимости коэффициента излучения  $\chi$  от температуры  $T$ , приведенные на рис. 3

№	Время отбора	$W_V$ , см <sup>3</sup> /см <sup>3</sup>	$W_M$ , г/г	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Зависимость
1	31.07 05:00	0.69	0.56	1.24	$\chi = \begin{cases} 7.5 - 0.026T, & 265 \leq T \leq 272.6, & R = -0.936, \sigma = 0.004, \\ 1.16 - 0.0027T, & 272 \leq T \leq 318.6, & R = -0.98, \sigma = 0.007 \end{cases}$
2	01.08 04:00	0.65	0.46	1.41	$\chi = \begin{cases} 2.07 - 0.006T, & 265 \leq T \leq 293, & R = -0.996, \sigma = 0.004, \\ 1.07 - 0.0025T, & 293 \leq T \leq 305, & R = -0.95, \sigma = 0.004 \end{cases}$
3	10:00	0.56	0.41	1.38	$\chi = \begin{cases} 2.19 - 0.006T, & 265 \leq T \leq 290, & R = -0.994, \sigma = 0.005, \\ 3.38 - 0.01T, & 290 \leq T \leq 302, & R = -0.991, \sigma = 0.005, \\ 1.16 - 0.002T, & 302 \leq T \leq 315, & R = -0.94, \sigma = 0.003 \end{cases}$
4	11:00	0.32	0.37	0.87	$\chi = \begin{cases} 1.6 - 0.003T, & 265 \leq T \leq 290, & R = -0.983, \sigma = 0.005, \\ 4.0 - 0.011T, & 290 \leq T \leq 304, & R = -0.987, \sigma = 0.003, \\ 1.78 - 0.004T, & 304 \leq T \leq 322, & R = -0.989, \sigma = 0.003 \end{cases}$
5	12:00	0.36	0.35	1.04	$\chi = \begin{cases} 1.71 - 0.0035T, & 265 \leq T \leq 287, & R = -0.983, \sigma = 0.006, \\ 3.24 - 0.009T, & 287 \leq T \leq 296, & R = -0.97, \sigma = 0.003, \\ 1.82 - 0.004T, & 296 \leq T \leq 320, & R = -0.991, \sigma = 0.003 \end{cases}$
6	13:00	0.28	0.18	1.56	$\chi = \begin{cases} 1.817 - 0.004T, & 265 \leq T \leq 292, & R = -0.983, \sigma = 0.004, \\ 5.88 - 0.018T, & 292 \leq T \leq 298, & R = -0.97, \sigma = 0.01, \\ 1.74 - 0.004T, & 298 \leq T \leq 321, & R = -0.992, \sigma = 0.004 \end{cases}$

Примечание.  $R$ ,  $\sigma$  — коэффициент корреляции и стандартное отклонение для  $\chi$ .

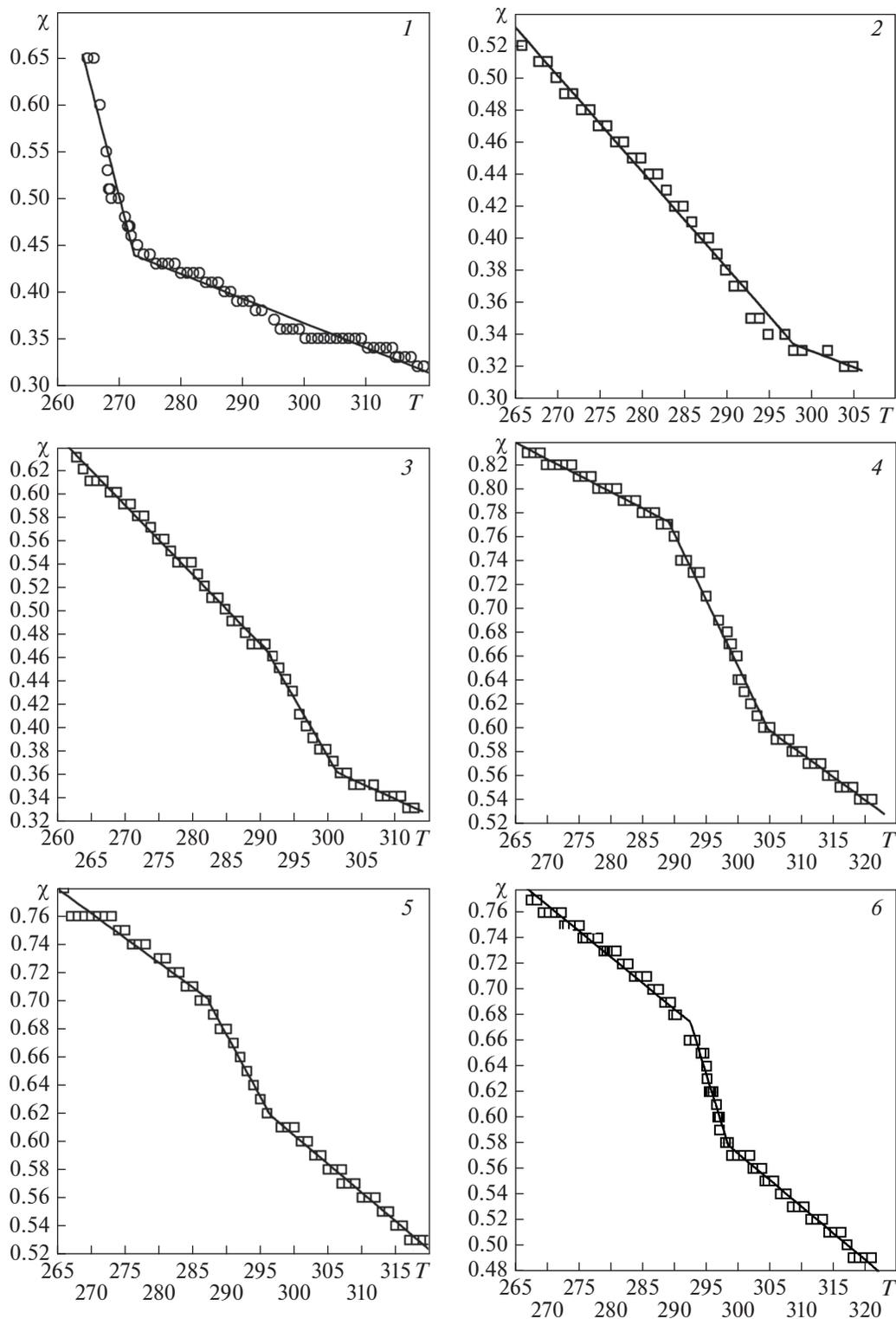
На рис. 3 приведены зависимости коэффициентов излучения  $\chi$  образцов засоленной почвы, отобранных в слое 0–2 см, от температуры ( $T$ ), рассчитанные по данным диэлектрических измерений. Образцы отбирали в одном месте в течение 34 ч в разное время суток, они различались по влажности. Измерения диэлектрических параметров почв производили при той же влажности, которая была на момент их отбора.

Зависимости  $\chi(T)$ , аппроксимированные прямыми линиями, разделенными точками изломов, приведены в табл. 2. Там же указано время отбора образцов, а также объемные доли воды ( $W_V$ ) в почве и минерализация водной вытяжки ( $Z$ ). Из графиков (рис. 3) видно, что приведенные зависимости имеют как количественные, так и качественные отличия, заключающиеся в наличии одного или двух изломов, соответствующих изменению поведения диэлектрических свойств исследуемых образцов.

График 1 соответствует случаю высокой объемной доли воды ( $W_V = 0.69$ ). Резкое уменьшение  $\chi$  с 0.65 до 0.45 при возрастании  $T$  с 265 до 272 К связано с таянием льда, образовавшегося при частичном замерзании почвенного раствора, представляющего собой соленый лед с пленкой солевого раствора в поровом пространстве. После таяния льда уменьшение  $\chi$  с повышением  $T$  может быть связано с увеличением растворимости солей. Подобное объяснение подтверждается тем, что скорости изменения  $d\chi/dT$  в интервалах 265–272 и

273–318 К, равные  $\approx 0.026$  и  $\approx 0.0027$ , различаются в 10 раз. Наблюдаемая высокая скорость изменения коэффициента излучения с изменением температуры может быть вызвана заменой пресноводного или слабосоленого льда, характеризующегося высокими значениями коэффициентов излучения ( $\chi \sim 0.8$ – $0.9$ ) на минерализованную воду, для которой в зависимости от минерализации коэффициент излучения изменяется в пределах 0.36–0.20 [9]. Дальнейшее повышение температуры ведет к увеличению растворимости соли. Но так как вся соль к этому моменту уже растворена, то влияние дальнейшего повышения температуры на величину  $\chi$  оказывается незначительным. Это подтверждается тем, что скорость изменения коэффициента излучения с изменением температуры уменьшилась в 10 раз. При этом не исключено влияние температуры на изменение диэлектрических характеристик связанной воды.

На графике 2 скачкообразного изменения  $\chi$  с повышением  $T$  в интервале 265–273 К не наблюдается. Это означает, что замерзания почвенного раствора не происходит и связано с тем, что при близких значениях  $W$  величина  $Z$  у второго образца выше. А чем более соленый раствор, тем при более низкой температуре он замерзает. Значения  $\chi$  монотонно уменьшаются в интервале 265–295 К (скорость изменения  $d\chi/dT \approx 0.006$ ), затем наблюдается излом, и скорость изменения снижается в 3 раза ( $d\chi/dT \approx 0.0002$ ). Подобное поведение  $\chi(T)$  может быть связано с изменением раствори-



**Рис. 3.** Зависимости коэффициента излучения ( $\chi$ ) от температуры ( $T$ ) для солевой корки солончака с объемной долей воды  $W_v = 0.69$  (1), 0.65 (2), 0.56 (3), 0.32 (4), 0.36 (5), 0.28 (6).

мостей солей, а также с возможным изменением диэлектрических характеристик связанной воды.

В отличие от графиков 1 и 2, на графиках 3–6 зависимости  $\chi(T)$  имеют по два излома, появле-

ние которых связано с изменениями, происходящими с минеральными солями при повышении температуры образца, а также зависимостями растворимостей солей от температуры (рис. 4).

Вид зависимостей  $\chi(T)$  до первого излома, характеризующийся невысокими скоростями изменения ( $d\chi/dT \approx 0.003-0.006$ ), может быть связан с недостатком влаги для полного растворения всех солей. В этом интервале часть солей может находиться в состоянии кристаллогидратов.

Сравнение графиков 3–6 со справочными данными о растворимости минеральных солей в воде при разных температурах [12] указывает на то, что появление на зависимостях  $\chi(T)$  первого излома и дальнейшее изменение значений  $\chi$  с ростом  $T$  связано с резким увеличением растворимости высокогигроскопичной соли  $\text{CaCl}_2$ , а также солей  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Переход безводной соли в насыщенный раствор в результате повышения растворимости с ростом температуры ведет к уменьшению коэффициента излучения засоленного грунта. Соответственно с этим, скорости изменения ( $d\chi/dT \approx 0.009-0.018$ ) увеличиваются в 2–4 раза. Подобное поведение радиоизлучательных характеристик засоленной почвы может быть связано с дополнительным растворением части соли в почвенной воде и образованием новых порций насыщенного раствора.

Дальнейшее повышение температуры ведет к увеличению растворимости, в результате этого раствор, бывший насыщенным при данной температуре, при более высокой температуре становится разбавленным. Соответственно с этим значение  $\chi$  продолжает понижаться, но при этом скорость изменения ( $d\chi/dT \approx 0.002-0.004$ ) по сравнению с предыдущим случаем уменьшается от 2 до 5 раз.

Второй излом на графиках наблюдается в интервале температур 295–305 К, соответствующих температурам плавления кристаллогидратов  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  [12]. Соответственно, в этом температурном интервале может происходить высвобождение кристаллизационной воды с образованием насыщенного раствора.

После растворения всех солей, находящихся в образце, дальнейшее повышение температуры ведет к тому, что раствор становится более разбавленным. Коэффициент излучения разбавленного раствора выше коэффициента излучения насыщенного раствора. Соответственно с этим, на зависимости  $\chi(T)$  появляется второй излом, и происходит изменение поведения диэлектрических и радиоизлучательных характеристик всего образца.

Из сравнения графиков 3–6 видно, что зависимости  $\chi(T)$  качественно похожи. Количественные различия обусловлены разными значениями влажности и разными температурами точек излома. Анализ первых производных  $d\chi/dT$ , характеризующих скорость изменения  $\chi$  с изменением температуры указывает на одинаковость процессов, протекающих в засоленной почве, различаю-

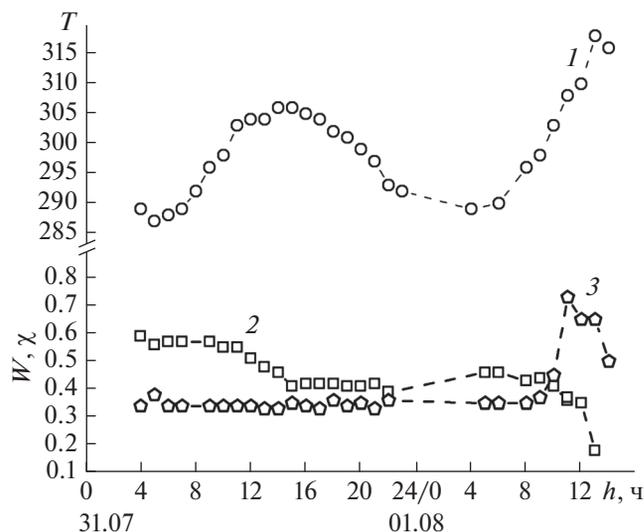


Рис. 4. Суточные вариации температуры засоленной почвы на глубине 1 см (1), объемной доли воды (2) в поверхностном слое 0–2 см, коэффициента излучения (3).

щейся по влажности и минерализации почвенного раствора.

**Суточные вариации радиоизлучательных характеристик засоленной почвы.** Как было показано выше, радиоизлучательные характеристики засоленной почвы, зависят от совокупного влияния влажности и температуры. На рис. 4 приведены графики суточной динамики температуры поверхности солончака на глубине 1 см, объемной доли воды  $W_V$  в слое 0–1 см, коэффициента излучения. Различие зависимости суточного хода  $T(h)$  за первые и вторые сутки связано с разной скоростью прогрева засоленной почвы, различающейся по влажности. В первые сутки на поверхности солончака наблюдалось уменьшение  $W_V$  с 0.7 до 0.6, вызванное интенсивным испарением высокоминерализованной почвенно-грунтовой воды и накоплением солей на поверхности засоленной почвы в результате подтягивания в поверхностный слой минерализованной воды. Во вторые сутки наблюдалось понижение  $W_V$  с 0.6 до 0.3 при возрастании температуры с 295 до 310 К. Так же как и в первые сутки, основной причиной уменьшения  $W_V$  являлось испарение.

Использование зависимостей  $\chi(W_V)$  (рис. 2Б),  $\chi(T)$  (рис. 3),  $T(h)$  (кривая 1 на рис. 4) позволяет рассчитать коэффициенты излучения поверхности солончака и оценить суточные вариации  $\chi(h)$  (кривая 3 на рис. 4), зависящие от совокупного влияния температуры и объемной доли воды в засоленной почве. На график  $\chi(h)$  наносились значения  $\chi$ , рассчитанные при значении  $T$ , которое было на момент отбора образца (по данным суточной динамики  $T(h)$ ).

Из графиков 1–2 (рис. 3) видно, что наблюдавшееся в первые сутки изменение  $T$  (в пределах 292–306 К),  $W_V$  (уменьшение с 0.6 до 0.4) не сказалось заметным образом на вариациях  $\chi$  (0.35–0.40). Из сравнения значений  $W_V$  и  $Z$ , приведенных в табл. 1, а также из результатов анализа повторных вытяжек следует, что вся соль в почве в этот период времени была растворена и находилась в виде почвенного раствора. Во вторые сутки, одновременное возрастание  $T$  (с 295 до 310 К) (выше температуры плавления кристаллогидратов  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) и уменьшение  $W_V$  с 0.4 до 0.35 г/г привело к скачкообразному увеличению  $\chi$  с 0.45 до 0.73 (3). Основными причинами подобного поведения коэффициента излучения является уменьшение влажности засоленной почвы в результате распада кристаллогидратов, высвобождения кристаллизационной воды и ее испарения, а также отложение на поверхность солончака обезвоженных солей, характеризующихся высокими значениями  $\chi$ .

Дальнейшее возрастание температуры до 318 К привело к образованию иссушенного слоя засоленной почвы на поверхности солончака, характеризующегося слабым поглощением электромагнитных волн микроволнового диапазона. В результате этого толщина скин-слоя засоленной почвы увеличилась, и на микроволновое излучение подстилающей поверхности стали оказывать влияние нижележащие слои засоленной почвы, характеризующиеся более высокой влажностью. Соответственно с этим произошло резкое уменьшение коэффициента излучения  $\chi$  с 0.73 до 0.50.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментальных исследований показано, что радиоизлучательные характеристики засоленной почвы зависят от соотношения между температурой, влажностью и засоленностью почвы.

Влияние влажности на микроволновое излучение засоленной почвы проявляется в том, что одновременно с изменением влажности почвы происходит изменение минерализации почвенного раствора. Соответственно с этим, при разных значениях  $W$  соль в почве может находиться в обезвоженном виде, в виде кристаллогидрата или почвенного раствора разной солёности. Установленные радиационно-влажностные зависимости могут быть использованы для дистанционной оценки влажности засоленной почвы.

На зависимостях коэффициента излучения от температуры выделяются три интервала с разным поведением радиоизлучательных характеристик. В каждом из интервалов зависимости  $\chi(T)$  аппроксимированы прямыми линиями.

Установлены суточные вариации коэффициента излучения, которые могут быть использованы

для дистанционной оценки засоленности. Использование зависимостей  $T(h)$ ,  $\chi(T)$ ,  $\chi(W_V)$  позволяет установить суточную динамику коэффициентов излучения и радиояркостной температуры солончака, по спутниковым измерениям радиоизлучательных характеристик и физических температур подстилающей поверхности в микроволновом и инфракрасном диапазонах, рассчитать влажность засоленной почвы.

Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют лучше понять закономерности микроволнового излучения солончаков и могут быть использованы при разработке методов радиофизического мониторинга засоленных почв.

**Благодарность.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 15-45-04060, 18-05-00753).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Добровольский Г.В., Шоба С.А. Сохранить и эффективно использовать почвы России как ее незамеченное национальное богатство // Почвоведение. 2005. № 8. С. 908–914.
2. Загоскин В.В., Нестеров В.М., Замотринская Е.А., Михайлова Г.Г. Зависимость диэлектрической проницаемости влажных дисперсных материалов от температуры // Изв. вузов. Физика. 1982. № 1. С. 65–68.
3. Засоленные почвы Западной Сибири. Новосибирск: Наука Сиб. отд-ние, 1981. 152 с.
4. Засоленные почвы России. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2006. 854 с.
5. Карпачевский Л.О. Динамика свойств почвы. М.: ГЕОС, 1997. 170 с.
6. Ковда В.А. Моделирование процессов засоления и осолонцевания почв. М.: Наука, 1980. 264 с.
7. Комаров С.А., Миронов В.Л., Романов А.Н. Аэрокосмическое зондирование гидрологического состояния почв радиофизическими методами. Барнаул: Изд-во АГУ, 1997. 104 с.
8. Митник Л.М., Афромеева И.А. Влияние температуры на излучательную способность влажной почвы в СВЧ-диапазоне // Метеорология и гидрология. 1977. № 8. С. 16–22.
9. Митник Л.М. Излучательные характеристики водной поверхности. Сер. Океанология (обзор). Обнинск: Информ. центр, 1978. 66 с.
10. Панкова Е.И., Новикова А.Ф. Площади засоленных почв в земельном фонде России // Почвоведение. 2005. № 8. С. 930–944.
11. Панкова Е.И., Конюшкова М.В. Климат и засоленность почв пустынь Центральной Азии // Почвоведение. 2013. № 7. С. 771–777.
12. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник / Под ред. А.А. Потехина и А.И. Ефимова. СПб: Химия, 1994. 432 с.
13. Редли М., Панкова Е.И. Результаты современных исследований засоленных почв в Европе // Почвоведение. 2004. № 12. С. 1473–1485.
14. Романов А.Н. Влияние термодинамической температуры на диэлектрические характеристики минералов и связанной воды в микроволновом диапа-

- зоне // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 1. С. 91–95.
15. Романов А.Н. Модель влажностной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости засоленной почвы // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. № 12. С. 1465–1473.
  16. Романов А.Н. Дистанционная оценка степени деградации почв по их радиоизлучательным свойствам // Почвоведение. 2009. № 3. С. 355–363.
  17. Bell D., Menges C., Ahmad W., Zyl J.J. The application of dielectric retrieval algorithms for mapping soil salinity in a tropical coastal environment using airborne polarimetric SAR // Remote Sensing Environ. 2001. V. 75. № 3. P. 375–384.
  18. Ding J.-I., Wu M.-C., Tiyyip T. Study on Soil Salinization Information in Arid Region Using Remote Sensing Technique // Agricultural Sciences in China. 2011. V. 10. № 3. P. 404–411.
  19. Farifteh J., Farshad A., George R.J. Assessing salt-affected soils using remote sensing, solute modelling, and geophysics // Geoderma. 2006. V. 130. № 3–4. P. 191–206.
  20. Guo Y., Shi Z., Zhou L.-Q., Jin X., Tian Y.-F., Teng H. Integrating Remote Sensing and Proximal Sensors for the Detection of Soil Moisture and Salinity Variability in Coastal Areas // J. Integrative Agriculture. 2013. V. 12. № 4. P. 723–731.
  21. Hallikainen M.T., Ulaby F.T., Dobson M.S., El-Reyze M. Dielectric Measurement of Soil in the 3 to 7 GHz Band between –50 and +23°C // IGARSS'84 Symp. Strasbourg, 27–30 Aug. 1984. P. 163–168.
  22. Klein I., Dietz A.J., Gessner U., Galayeva A., Myrzhakmetov A., Kuenzer C. Evaluation of seasonal water body extents in Central Asia over the past 27 years derived from medium-resolution remote sensing data // Int. J. Appl. Earth Observation and Geoinformation. 2014. V. 26. P. 335–349.
  23. Mashimbye Z.E., Cho M.A., Nell J.P., Clercq W.P., Niekerk A., Turner D.P. Turner model-based integrated methods for quantitative estimation of soil salinity from hyperspectral remote sensing data: a case study of selected South African soils // Pedosphere. 2012. V. 22. № 5. P. 640–649.
  24. Metternicht G.I. Fuzzy classification of JERS-1 SAR data: an evaluation of its performance for soil salinity mapping // Ecological Modelling. 1998. V. 111. № 1. P. 61–74.
  25. Metternicht G.I., Zinck J.A. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints // Remote Sensing of Environment. 2003. V. 85. № 1. P. 1–20.
  26. Mironov V.L., De Roo R.D., Savin I.V. Temperature-dependent microwave dielectric model for an arctic soil. geoscience and remote sensing // IEEE Transactions on. 2010. V. 48. P. 2544–2556.
  27. Sima S., Ahmadalipour A., Tajrishy M. Mapping surface temperature in a hyper-saline lake and investigating the effect of temperature distribution on the lake evaporation // Remote Sensing Environ. 2013. V. 136. P. 374–385.
  28. Singh A., Seitz F., Schwatke C. Inter-annual water storage changes in the Aral Sea from multi-mission satellite altimetry, optical remote sensing, and GRACE satellite gravimetry // Remote Sensing Environ. 2012. V. 123. P. 187–195.
  29. Stogryn A. Equation for Calculation the Dielectric Constant of Saline Water // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. 1971. MIT-19. P. 733–736.
  30. Wang Q., Li P., Pu Z., Chen X. Calibration and validation of salt-resistant hyperspectral indices for estimating soil moisture in arid land // J. Hydrology. 2011. V. 408. № 3–4. P. 276–285.

## Influence of the Water Content and Temperature on the Dielectric and Radio-Emitting Properties of the Salt Crust of Playa Solonchak

A. N. Romanov\*

*Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
ul. Molodezhnaya 1, Barnaul, 656038 Russia*

*\*e-mail: romanov\_alt@mail.ru*

The use of remote microwave methods for monitoring saline soils is limited by the poor knowledge of the dielectric and radio-emitting characteristics of the salt crust formed on the surface of solonchaks. The results of multiple studies on the estimation of diurnal variations in the real and imaginary parts of the complex dielectric permittivity of the solonchak are presented. Samples of the salt crust of solonchak were taken during the summer period in the Kulunda Steppe (Altai region) from a 2 × 2 m plot for 34 hours with a periodicity of 1 hour. Under laboratory conditions, their dielectric characteristics were measured, the water content and density were determined, and the chemical analysis of water extract was performed. Laboratory measurements of the dielectric parameters were carried out using bridge circuits at a frequency of 1.41 GHz with the temperature control in the range of 265–320 K and the moisture control in the range of 0–0.50 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>. The dependence of the volumetric water content of the solonchak on the radiation coefficient was obtained. This dependence can be used to estimate the salinity of the soil from remote sensing data in the microwave range. The effect of temperature on the dielectric and emission characteristics of the solonchak was also studied. Dependences of the emissivity on the temperature were assigned to intervals with different behaviors of the emission characteristics. For each interval, linear dependences of the solonchak emissivity on the temperature were established. Daily variations in the emission characteristics of the solonchak surface were revealed. It was shown that the radio wave emission characteristics of the solonchak depend on the relationship between the soil temperature, water content, and salinity. The studied regularities of microwave radiation from the solonchaks can be used in the development of the methods for radiophysical monitoring of saline soils.

*Keywords:* complex dielectric constant, emissivity, microwave range, saline soils, mineralization, soil solution