

Дистанционный микроволновый индикатор обводнённости солончака

А. Н. Романов

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, 656038, Россия
E-mail: romanov_alt@mail.ru*

Гидрологические изменения, связанные с глобальным потеплением и происходящие в разных регионах земного шара с разной интенсивностью, ведут к нарушению устоявшихся экосистем, существенным образом осложняют социально-экономические проблемы населения. В аридных и полуаридных зонах Северной Евразии к негативным последствиям этих изменений относятся аридизация климата, снижение водообеспеченности территорий, активизация почвенных и гидрологических засух, частичное или полное пересыхание солёных озёр и образование на их месте солончаков. В настоящей работе приведено описание результатов натурных и лабораторных исследований диэлектрических характеристик грунта, отобранного с поверхности содового солончака (*англ.* sodic gleyic solonchak), образовавшегося на осушенной части гиперсолёного содового озера. Для возможности моделирования диэлектрических свойств природного солончака измерялись диэлектрические параметры химически чистого образца минеральной соли Na_2CO_3 и её водного раствора. Показана возможность наблюдения изменения коэффициента излучения и радиояркостной температуры солончака, поверхность которого при высыхании представляет собой солевую корку. Перепад радиояркостной температуры, достигающий 100 К в течение одного дня, может быть обнаружен при дистанционном микроволновом зондировании подстилающей поверхности. Предложен алгоритм дистанционного микроволнового мониторинга солончаков по их радиоизлучательным параметрам. Разработан дистанционный микроволновый индикатор обводнённости солончака, который может быть использован для обнаружения солончаков посредством дистанционного микроволнового мониторинга с беспилотных летательных аппаратов, малой авиации, спутников.

Ключевые слова: пересыхающие гиперсолёные озёра, солончаки, радиоизлучательные характеристики, микроволновый диапазон

Одобрена к печати: 04.07.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-302-314

Введение

В последние десятилетия в мире происходят значительные гидролого-климатические изменения, связанные с глобальным потеплением, интенсивность которых в разных регионах заметно различается. Весьма чувствительны к гидролого-климатическим изменениям частично или полностью пересыхающие в течение года солёные и гиперсолёные озёра, а также образующиеся на их осушенных берегах солончаки. Сезонная динамика площадей солончаков и озёр представляет собой объективный индикатор аридизации территории и может быть использована для дистанционного мониторинга происходящих гидролого-климатических изменений, в том числе почвенных засух, снижающих урожайность сельскохозяйственных культур, гидрологических засух, способствующих негативным изменениям сложившихся водных экосистем.

Солончаки представляют собой тип почвы, характеризующийся наличием в верхних горизонтах легкорастворимых солей NaCl , Na_2CO_3 , Na_2SO_4 , CaCl_2 , MgCl_2 и образуемых ими кристаллогидратов в количествах, препятствующих развитию большинства растений (IUSS..., 2006, 2022). Солончаки приурочены к засушливым и полузасушливым климатическим зонам, прибрежным районам озёр, морей, широко распространены в степных, полупустынных и пустынных регионах земного шара, в том числе в Центральной Азии, Китае, на юге Европы, Центральной Африке, Австралии, Северной и Южной Америке. Размеры солончаков колеблются от десятков квадратных метров до 10 582 км² (площадь крупнейшего в мире солончака Уюни (*исп.* Uyuni), Боливия).

Физико-химические свойства солончаков зависят от температуры окружающей среды, увлажнения, типа и количества минеральных солей. Применение существующих дистанционных методов зондирования почвенного покрова на солончаках сопряжено с возникновением значительной погрешности.

Свойства солончаков, оценка их сельскохозяйственного использования, влияние на окружающую среду исследуются достаточно давно (Базилевич, 1965; Ковда, 1937, 1946, 1984). В работе (Лебедева (Верба) и др., 2008) изучен химический состав 44 озёр в Кулундинской степи, а также состав минеральных солей донных отложений и солевых корок сорочных солончаков.

Изучение механизмов усыхания гиперсолёных озёр и образования на их месте солончаков необходимо для понимания социально-гидрологических перспектив развития и устойчивости складывающихся экосистем (Pouladi et al., 2022). По мере снижения уровня воды в озере и сокращения его площади в прибрежной зоне происходит деградация почвы и растительности, развитие пустынь и засоление дна высохшего озера, образование солончаков (Alizade Govarchin Ghale et al., 2019, 2021; Ghasempour et al., 2024; Kazemi et al., 2025; Xiao et al., 2025).

В работе (Лямина и др., 2010) рассмотрено использование методов дистанционного мониторинга площадей озёр и солончаков на основе полевых наблюдений и космических снимков среднего разрешения со спутников Landsat и SPOT, охватывающих период с 1989 по 2008 г. Измерения отражательной способности *in situ* и спутниковые снимки Landsat применялись для разработки классификации щелочно-солёных озёр (Tebbs et al., 2015). В публикации (Bouaziz et al., 2011) предложен подход, основанный на данных MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (спутник Terra) и геохимических наземных измерений.

В работе (Трофимов и др., 2015) в качестве дистанционных индикаторов опустынивания предложено использовать: 1) площадь выделов, занятую засоленными почвами; 2) степень и химизм засоления почв; 3) глубину залегания и минерализацию грунтовых вод. Дистанционные индикаторы опустынивания включают: 1) тон и цвет изображения; 2) площадь и форму контуров; 3) контрастность выделов на общем фоне; 4) выраженность их структуры; 5) коэффициенты спектральной и интегральной яркости; 6) сопряжённость с опустыненными и неопустыненными землями.

В работе (Глушкова и др., 2016) выдвинута идея об использовании солончаков для дистанционной индикации процессов аридизации на юге Западной Сибири. На основе данных MODIS было выделено пять классов объектов: 1) озёра, вновь заполнившиеся водой; 2) солончаки, появившиеся за счёт деградации растительности; 3) солончаки, образовавшиеся в результате высыхания озёр; 4) галофитные сообщества по солончакам; 5) зарастающие озёра. Разработанная методика позволяет на основе морфометрического анализа палеоозёрных котловин оценить заозёрность территории в контексте уменьшения площади озёр на исследуемой территории за счёт появления солончаков.

В работе (Sun et al., 2016) осуществлена идентификация видов солончаков на основе нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), рассчитанного по данным спутника HuanJing-1. Различение разных типов солончаков оказалось неточным из-за их сильного спектрального сходства.

В публикациях (Панкова, 2015; Панкова, Горохова, 2020) показано, что данные о площадях засоленных и солонцовых почв, нуждаются в уточнении на основе современных дистанционных методов и наземного почвенного картографирования. В работе (Lopes et al., 2020) проведена оценка площади солончаков и изменения состояния с использованием снимков Landsat за 35-летний период на примере эстуария реки Тежу (Португалия). Показано, что сочетание индекса растительности VI (*англ.* Vegetation Index) и нормализованного разностного водного индекса NDWI (*англ.* Normalized Difference Water Index) позволяет эффективно картировать площадь солончаков в эстуариях.

В работах (Mohamed et al., 2023; Stückemann, Waske, 2022; Zhang et al., 2021) предложен метод картирования солончаков с использованием спектрально-временных оптических данных Sentinel-2, Landsat-8, а также инструмента SAR (*англ.* Synthetic Aperture Radar) Sentinel-1. Разработана классификация солончаков на основе базового классификатора Random Forest

(алгоритма машинного обучения «случайный лес», состоящего из множества отдельных независимых «решающих деревьев»).

Значительные изменения физических характеристик солончаков происходят в период снеготаяния. Так, например, дистанционное зондирование акватории Большого Солёного озера (США) в период раннего таяния снега позволило выявить особенности сезонного изменения площадей солончака и озера в весенний период (Hall et al., 2021).

Для оценки засоленности почвы использовалась Глобальная навигационная спутниковая система Cyclone (*англ.* Cyclone Global Navigation Satellite System). В качестве показателя засоленности почвы была выбрана электропроводность почвы (Wang et al., 2023). Данные Landsat-8 и Sentinel-1 использовались для разработки модифицированного индекса засоления (*англ.* Modified Salinity Index) (Gopi, Annadurai, 2024). В работе (Aihaiti et al., 2025) описан усовершенствованный метод оценки засоленности почвы в засушливых регионах с использованием интегрированных данных Radarsat-2 SAR, Sentinel-2. Разработаны два индекса солёности, основанные на использовании данных спутника SDGSAT-1 (*англ.* Sustainable Development Science Satellite-1) в тепловом диапазоне (Gao et al., 2025). Многоспектральные данные Landsat-8 OLI (*англ.* Operational Land Imager) и Sentinel-2A MSI (*англ.* Multispectral Imager, мультиспектральный датчик изображения) использовались для прогнозирования засоления в региональном масштабе (Wang et al., 2021). На основе этих данных был разработан улучшенный индекс засоленности почвы ERSSI (*англ.* Enhanced Residues Soil Salinity Index), показавший высокую корреляцию с засолением верхнего слоя почвы (Wang et al., 2022).

В работе (Shinkarenko, Bartalev, 2024) показана возможность картографирования сорových солончаков, представляющих собой понижения рельефа, на дне которых активно развиваются процессы солончакообразования, находятся постоянные или пересыхающие солёные и солоноватые водоёмы. Для картографирования солончаков использовались среднесезонные значения NDVI и NDWI, рассчитываемые по данным Landsat.

В микроволновом диапазоне радиоизлучательные и диэлектрические свойства солончаков зависят от совокупного влияния влажности, температуры, концентрации и типа солей (Guo et al., 2013; Mulder et al., 2011; Romanov, 2019a). В работе (Romanov, Khvostov, 2018) показано на примере солончака, образовавшегося на осушенном дне озера Большой Ажбулат (Казахстан), что радиоизлучательные параметры солончака могут в течение суток изменяться в широких пределах. В исследованиях (Romanov, 2019b; Romanov et al., 2025) изучена суточная динамика радиоярких характеристик солончаков в летний период. В настоящей работе для дистанционного мониторинга солончаков и пересыхающих солёных озёр предложен новый дистанционный микроволновый индикатор обводнённости солончака.

Методика исследований

В качестве основных объектов исследования использовали образцы солончакового грунта, отбиравшиеся с поверхностного слоя (0–1 см) содового солончака (Кулундинская равнина, Алтайский край) в летний период в течение 40 ч с периодичностью в 1–3 ч. Отбор проб проводили через сутки после дождя, когда началось высыхание поверхности солончака. Образцы солончакового грунта помещали в герметические боксы для определения в лабораторных условиях влажности, засоленности, а также для измерения диэлектрических и радиоизлучательных параметров.

Для солончаков, в составе которых содержатся минеральные соли, образующие кристаллогидраты, радиоизлучательные характеристики зависят от соотношения между температурой (T), объёмной влажностью (W) и засоленностью (Z). Соответственно, в натурных условиях детальное изучение поведения радиоизлучательных характеристик солончака сильно затруднено из-за значительных суточных и сезонных вариаций T , W , Z . В содовом солончаке основной солью является Na_2CO_3 (кальцинированная сода) и её кристаллогидраты: моногидрат $\text{Na}_2\text{CO}_3 \times \text{H}_2\text{O}$ (термонатрит), гептагидрат $\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 7\text{H}_2\text{O}$, декагидрат $\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 10\text{H}_2\text{O}$ (натрит, сода) (Рабинович, Хавин, 1978). Поэтому в лабораторных условиях на частоте

1,41 ГГц исследовали диэлектрические и радиоизлучательные характеристики химически чистого образца минеральной соли Na_2CO_3 и её водного раствора. Растворение проводили в дистиллированной воде.

Основные характеристики микроволнового излучения подстилающей поверхности — радиояркость температура $T_{\text{я}}$ и коэффициент излучения χ , связанные между собой известным соотношением (см., например, (Шарков, 2014; Шутко, 1986)):

$$T_{\text{я}} = \chi T_{\text{эф}},$$

где $T_{\text{эф}}$ — эффективная температура подстилающей поверхности в скин-слое толщиной $L_{\text{эф}} = \lambda / (4\pi\sqrt{|\varepsilon|} \cdot \text{tg}\delta)$; λ — длина волны; ε — комплексная диэлектрическая проницаемость почвы, $|\varepsilon| = \varepsilon' \sqrt{1 + \text{tg}^2\delta}$, $\text{tg}\delta = \varepsilon''/\varepsilon'$ — тангенс угла потерь, ε' , ε'' — действительная и мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости почвы.

Диэлектрические характеристики измеряли на лабораторной установке мостового типа, предназначенной для дисперсных и жидких материалов. Определяли модуль $|A|$ и фазу φ комплексного коэффициента прохождения электромагнитной волны с частотой 1,41 ГГц в волноводе через исследуемый образец. Погрешности измерения $|A|$ и φ составляли не более 0,2 дБ и 0,2° соответственно. Полученные величины использовали для расчёта действительной (ε') и мнимой (ε'') части комплексной диэлектрической проницаемости и связанного с ними формулами Френеля коэффициента излучения χ . Расчёт проводили для угла зондирования 0° (в нади́р). Пересчёт значений χ на любой другой угол зондирования возможен с использованием формул Френеля. Лабораторные измерения проводили при температуре образца $t = 24 \pm 1$ °С. Подробное описание методики диэлектрических измерений приведено в работах (Комаров и др., 1997; Романов, 2002).

Для количественного описания содержащейся в образце воды использовали объёмную влажность, определяемую из соотношения $W = (\rho/\rho_{\text{в}})W_{\text{м}}$, где $W_{\text{м}}$ — массовая влажность, $W_{\text{м}} = M_{\text{в}}/M$, $M_{\text{в}}$ — масса содержащейся в образце воды, $M_{\text{в}} = M - M_{\text{сух}}$, M , $M_{\text{сух}}$ — масса влажного и высушенного образцов; ρ , $\rho_{\text{в}}$ — плотность почвенного образца и воды соответственно, $\rho_{\text{в}} \approx 1 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$. Засолённость почвы определяли по формуле $Z = M_{\text{с}}/M$. Массовую концентрацию соли в растворе S определяли по формуле $S = M_{\text{с}}/M_{\text{р}}$, где $M_{\text{р}}$ — масса раствора, $M_{\text{р}} = M_{\text{с}} + M_{\text{в}}$, $M_{\text{с}}$ — масса безводной соли.

Результаты исследований

Как показали результаты натурных и лабораторных исследований, диэлектрические и радиоизлучательные характеристики солончакового грунта могут испытывать резкие изменения в течение нескольких часов. Значительные суточные колебания T , W , Z способны существенным образом изменить диэлектрические и радиоизлучательные характеристики солончакового грунта. На *рис. 1* (см. с. 306) приведены суточные и часовые вариации температуры солончака на глубине 1 см (1), 5 см (2), 10 см (3), объёмной влажности W (4) и засолённости Z (5) в слое 0–1 см. Из *рис. 1* видно, что во вторые сутки с 08:00 до 13:00 T (1) увеличилась на 20 К, градиент температуры ($\Delta T = T(0 \text{ см}) - T(10 \text{ см})$) в слое 0–10 см достиг 15 К. Для сильно засоленных почв и соляных корок изменение T ведёт к изменению растворимости минеральных солей. За этот же период Z уменьшилась с 0,5 до 0,2 г/г, а W — с 0,7 до 0,3 $\text{см}^3\cdot\text{см}^{-3}$. Содержание физической глины (почвенных частиц размером $< 0,01 \text{ мм}$) составило для исследованного солончакового грунта 43 %, что соответствует по гранулометрическому составу легкоглинистым почвам. Объёмная доля связанной влаги $W_{\text{т}}$, определённая автором данной статьи на основе результатов диэлектрических измерений, составила: $W_{\text{т}} = 0,18 \text{ см}^3\cdot\text{см}^{-3}$.

Наблюдавшиеся в натурных условиях подобные значительные изменения T , W , Z привели к тому, что значения ε' солончакового грунта уменьшились с 30 до 9 (в 3 раза), а ε'' — с 60 до 8 (в 7,5 раза) (*рис. 2*, см. с. 306), величина χ увеличилась с 0,3 до 0,6, а $T_{\text{я}}$ — с 100 до 200 К (*рис. 3*, см. с. 307).

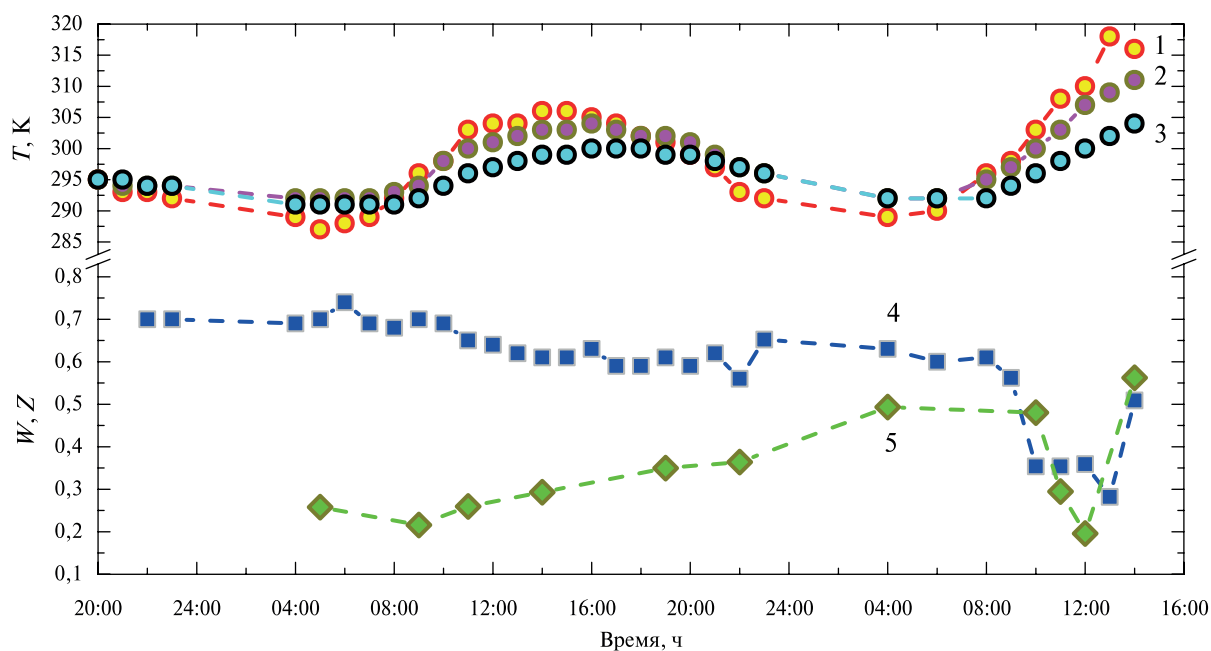


Рис. 1. Суточные вариации температуры в слоях 1 см (1), 5 см (2), 10 см (3), объёмной влажности (4) и засолённости (5) в поверхностном слое 0–1 см

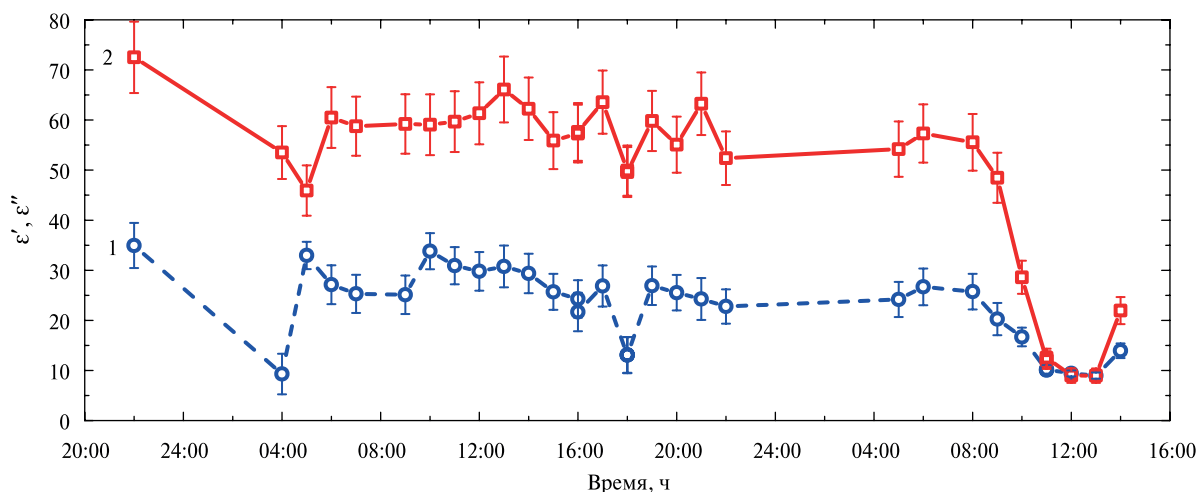


Рис. 2. Суточные вариации действительной (1) и мнимой (2) части комплексной диэлектрической проницаемости солончакового грунта на частоте 1,41 ГГц

Подобные весьма значительные вариации χ и $T_{\text{я}}$, наблюдаемые в течение нескольких часов, ставят под сомнение возможность объективного и надёжного дистанционного микроволнового мониторинга солончаков. Для изучения физических механизмов изменения диэлектрических и радиоизлучательных свойств солончаков исследовались вариации χ на основе лабораторных измерений диэлектрических и радиоизлучательных параметров минеральной соли Na_2CO_3 (основная соль содового солончака) при вариациях S (в г/г) в диапазоне от 0 до 1. По результатам исследований построена зависимость $\chi(S)$ в диапазоне S от 0 (пресная вода) до 1 (обезвоженная соль), приведённая на рис. 4 (см. с. 307). На этой зависимости отмечена массовая концентрация соли, соответствующая декагидрату (температура плавления $t_{\text{плав}} = 32,5^\circ\text{C}$); гептагидрату ($t_{\text{плав}} = 35,4^\circ\text{C}$) и моногидрату, образуемому при температуре $t > 35,4^\circ\text{C}$ и в интервале $t = 100...120^\circ\text{C}$ теряющему воду с образованием Na_2CO_3 . Численные значения $S_{\text{к1}}$, $S_{\text{к7}}$, $S_{\text{к10}}$ рассчитаны исходя из соотношения атомных масс веществ, входящих в химические формулы кристаллогидратов:

$$S_{к1} = \frac{m(\text{Na}_2\text{CO}_3)}{m(\text{Na}_2\text{CO}_3 \times \text{H}_2\text{O})} \approx 0,85, \quad S_{к7} = \frac{m(\text{Na}_2\text{CO}_3)}{m(\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 7\text{H}_2\text{O})} \approx 0,46,$$

$$S_{к10} = \frac{m(\text{Na}_2\text{CO}_3)}{m(\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 10\text{H}_2\text{O})} \approx 0,37.$$

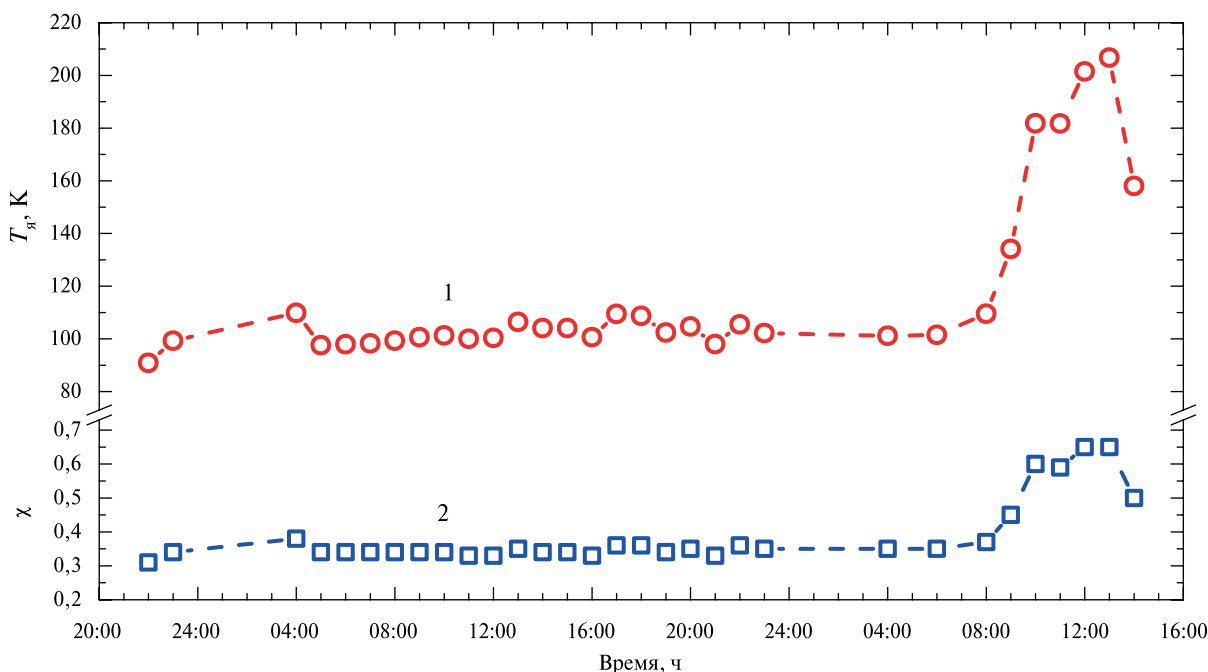


Рис. 3. Суточные вариации радиояростной температуры (1) и коэффициента излучения (2) на частоте 1,41 ГГц

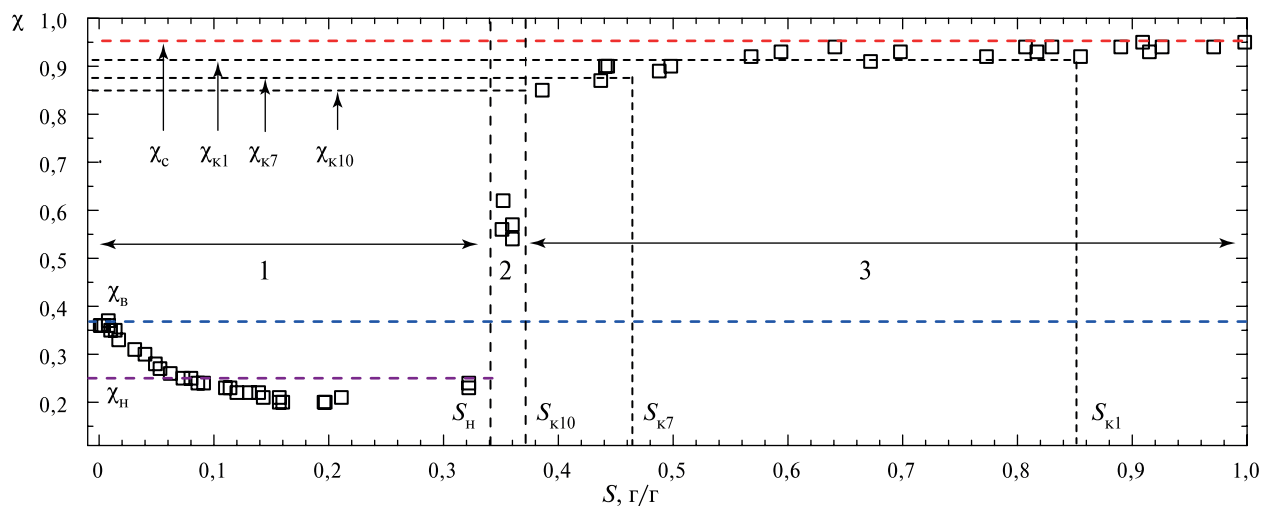


Рис. 4. Зависимость коэффициента излучения (χ) от массовой концентрации соли (S) для водно-солевой смеси Na_2CO_3 на частоте 1,41 ГГц: S_H , $S_{к10}$, $S_{к7}$, $S_{к1}$ соответствуют насыщенному раствору и 10-, 7-, 1-водным кристаллогидратам; 1, 2, 3 — диапазоны S , относящиеся к разным состояниям образца

Теоретически, исходя из предположения, что насыщенный раствор возникает из 10-водного кристаллогидрата при добавлении к нему одиннадцатой молекулы воды, получим:

$$S_H = \frac{m(\text{Na}_2\text{CO}_3)}{m(\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 11\text{H}_2\text{O})} \approx 0,35.$$

На основе результатов диэлектрических измерений были рассчитаны коэффициенты излучения безводной соли $\chi_c = 0,95$ ($S = 1$), 1-, 7-, 10-водных кристаллогидратов $\chi_{k1} = 0,92$ ($S = S_{k1}$), $\chi_{k7} = 0,89$ ($S = S_{k7}$), $\chi_{k10} = 0,85$ ($S = S_{k10}$) и насыщенного раствора $\chi_H = 0,25$ ($S = S_H$).

Из рис. 4 видно, что в диапазоне $0 \leq S \leq S_H$ наблюдается уменьшение значения $\chi_B \approx 0,36$, характерного для пресной воды, до $\chi_H = 0,25$, соответствующего насыщенному раствору. В диапазоне $S_H < S \leq S_{k10}$, соответствующем образованию декагидрата из насыщенного раствора, наблюдается довольно резкое возрастание коэффициента излучения с χ_H до χ_{k10} . Дальнейшее увеличение $S > S_{k10}$ вызывает нехватку воды для образования 10-водных кристаллогидратов, что ведёт к образованию кристаллогидратов меньшей водности и приводит к дальнейшему возрастанию коэффициента излучения до значений χ_{k7} и χ_{k1} (Романов, 2002, 2004).

Обсуждение

Возможность резкого изменения T_y и χ мелководных пересыхающих гиперсолёных озёр и солончаков весьма вероятна в тёплый период года при их усыхании и отложении солей на осушенную поверхность. Подобные изменения T_y подстилающей поверхности будут указывать на происходящие изменения физических характеристик пересыхающих озёр и солончаков, связанных с изменением типа подстилающей поверхности («озеро — солончак»).

Диапазон 1 на зависимости $\chi(S)$ (см. рис. 4) может быть использован для описания процесса повышения солёности воды до насыщенного раствора. Диапазон 2 соответствует образованию декагидрата из насыщенного раствора. В природных условиях переход от гиперсолёного пересыхающего озера к солончаку может занимать довольно длительный период, зависящий, в частности, от орографических особенностей подстилающей поверхности, в том числе от глубины озера. Этот диапазон вполне информативен с точки зрения изучения смены типа подстилающей поверхности. Диапазон 3 моделирует процесс дальнейшего обезвоживания кристаллогидратов до состояния сухой соли. Данному диапазону в природных условиях могут соответствовать процессы отложения солей на поверхности солончака и наступления периода повышенной вероятности возникновения пылевых бурь в результате ветрового переноса мелкодисперсных фракций токсичных солей, опасных для здоровья человека и животных.

Следует отметить, что в засоленной почве присутствует, как правило, не одна соль, а комплекс разных солей. Соответственно, возникает необходимость установления подобных зависимостей $\chi(S)$ для других типов солей, образующих кристаллогидраты, а также, возможно, для конкретных засоленных почв. Как показано в работе (Романов, 2002), закономерности поведения диэлектрических и радиоизлучательных свойств почв, содержащих в своём составе минеральные соли, образующие кристаллогидраты, имеют качественное сходство, но при этом различаются количественно. Для стандартизации подхода к дистанционному отслеживанию этапов взаимных переходов «озеро — солончак — озеро» возникает необходимость разработки дистанционного микроволнового индикатора обводнённости солончака.

На основе лабораторных измерений диэлектрических и радиоизлучательных характеристик минеральной соли Na_2CO_3 экспериментально установлены следующие критические значения коэффициентов излучения в зависимости $\chi(S)$, моделирующей изменение микроволнового излучения подстилающей поверхности при усыхании солёного озера и образовании на его месте солончака:

- 1) χ_B ($S = 0$) = 0,36 — коэффициент излучения пресной воды;
- 2) χ_H ($S = S_H$) = 0,25 — коэффициент излучения насыщенного раствора;
- 3) χ_k ($S = S_k$) = 0,85 — коэффициент излучения 10-водного кристаллогидрата;
- 4) χ_c ($S = 1$) = 0,95 — коэффициент излучения безводной соли.

При этом возникают следующие диапазоны χ , соответствующие разным состояниям системы «пересыхающее озеро – солончак»:

- 1) $\chi_B \leq \chi \leq \chi_H$ — озеро с разной солёностью воды (от пресной до насыщенного раствора);
- 2) $\chi_H < \chi \leq \chi_{K10}$ — солевая корка, состоящая из насыщенного раствора и кристаллогидратов $\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 10\text{H}_2\text{O}$;
- 3) $\chi_{K10} < \chi \leq \chi_C$ — солевая корка, состоящая частично из $\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 10\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \times \text{H}_2\text{O}$.

Исходя из экспериментально установленных критических значений χ , введём дистанционный микроволновый индикатор обводнённости солончака следующим образом:

1. $R_{BH} = (\chi_B - \chi) / (\chi_B - \chi_H)$ — этап усыхающего озера (вн — «вода – насыщенный раствор»), $S_B < S \leq S_H$.
2. $R_{HK} = (\chi_H - \chi) / (\chi_H - \chi_{K10})$ — этап образования кристаллогидратов (нк — «насыщенный раствор – кристаллогидрат»), $S_H < S \leq S_{K10}$.
3. $R_{KC} = (\chi_{K10} - \chi) / (\chi_{K10} - \chi_C)$ — этап обезвоживания кристаллогидратов, $S_{K10} < S \leq S_C$.

Значения χ_B , χ_H , χ_{K1} , χ_{K7} , χ_{K10} , χ рассчитаны для угла зондирования 0° (в надири). Для любого другого угла зондирования пересчёт значений χ возможен с использованием формул Френеля.

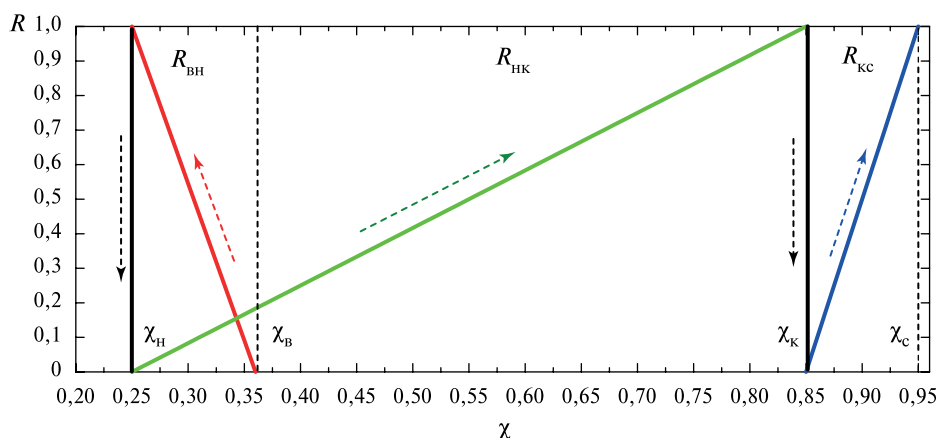


Рис. 5. Дистанционный микроволновый индикатор обводнённости солончака

График изменений дистанционного индикатора обводнённости солончака приведён на рис. 5. Пунктирными стрелками показана направленность изменения R с изменением в процессе усыхания солёного озера и образования солончака. Приведены диапазоны R , соответствующие разным состояниям системы «озеро – солончак». Из графика следует, что одно и то же значение R может соответствовать трём значениям χ . В то же время по измеренным значениям χ возможно однозначное определение R .

Заключение

Из анализа результатов полевых и лабораторных измерений следует вывод, что несмотря на значительную суточную изменчивость диэлектрических и радиоизлучательных характеристик солончаков, их дистанционный микроволновый мониторинг на основе выявленных зависимостей $\chi(S)$ и $\chi(W)$ вполне осуществим. Разработанный дистанционный микроволновый индекс обводнённости солончака может быть использован для мониторинга солончакообразования, скорости усыхания солёных озёр, оценки суммарной увлажнённости территории.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 25-27-20020 «Разработка методов дистанционного мониторинга солончаков как индикаторов гидрологических изменений территории (на примере Алтайского края)», <http://rscf.ru/project/25-27-20020/>.

Литература

1. *Базилевич Н. И.* Геохимия почв содового засоления. М.: Наука, 1965. 349 с.
2. *Глушкова Н. В., Чупина Д. А., Пчельников Д. В., Болдырев И. И., Селятицкая Н. А.* Картографирование и мониторинг процессов аридизации на юге Западно-Сибирской равнины // География и природные ресурсы. 2016. № 1. С. 133–140.
3. *Ковда В. А.* Солончаки и солонцы. Л.: Изд-во АН СССР, 1937. 246 с.
4. *Ковда В. А.* Происхождение и режим засоленных почв. Вып. 1. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1946. 574 с.
5. *Ковда В. А.* Проблемы борьбы с опустыниванием и засолением орошаемых почв. М.: Колос, 1984. 304 с.
6. *Комаров С. А., Миронов В. Л., Романов А. Н.* Аэрокосмическое зондирование гидрологического состояния почв радиофизическими методами. Барнаул: Изд-во Алтайского гос. ун-та, 1997. 104 с.
7. *Лебедева (Верба) М. П., Лопухина О. В., Калинина Н. В.* Особенности химико-минералогического состава солей в соровых солончаках и озерах Кулундинской степи // Почвоведение. 2008. № 4. С. 467–480.
8. *Лямина В. А., Глушкова Н. В., Смоленцева Е. Н., Зольников И. Д.* Использование методов ГИС и ДЗ для мониторинга площади озер и солончаков на территории юга Западной Сибири // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2010. Т. 4. № 2. С. 3–7.
9. *Панкова Е. И.* Засоленные почвы России: решенные и нерешенные проблемы // Почвоведение. 2015. № 2. С. 131–144.
10. *Панкова Е. И., Горохова И. Н.* Анализ сведений о площади засоленных почв России на конец XX и начало XXI веков // Бюл. Почвенного ин-та им. В. В. Докучаева. 2020. № 103. С. 5–33.
11. *Рабинович В. А., Хавин З. Я.* Краткий химический справочник, 3-е изд., СПб.: Химия, 1978. 392 с.
12. *Романов А. Н.* Диэлектрические и радиоизлучательные свойств засоленных почв. Барнаул: Изд-во Алтайского гос. ун-та, 2002. 118 с.
13. *Романов А. Н.* Влияние массовой концентрации минеральных солей на диэлектрические характеристики их водных растворов в микроволновом диапазоне // Радиотехника и электроника. Т. 49. № 9. 2004. С. 1157–1163.
14. *Трофимов И. А., Трофимова Л. С., Яковлева Е. П.* Дистанционные индикаторы опустынивания земель // Аридные экосистемы. 2015. Т. 21. № 1 (62). С. 36–40.
15. *Шарков Е. А.* Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы. В 2 т. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 548 с.
16. *Шутко А. М.* СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. 190 с.
17. *Aihaiti A., Nurmemet I., Yu X. et al.* An enhanced soil salinity estimation method for arid regions using multisource remote sensing data and advanced feature selection // Catena. 2025. V. 256. Article 109116. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109116>.
18. *Alizade Govarchin Ghale Y., Baykara M., Unal A.* Investigating the interaction between agricultural lands and Urmia Lake ecosystem using remote sensing techniques and hydro-climatic data analysis // Agricultural Water Management. 2019. V. 221. P. 566–579. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.028>.
19. *Alizade Govarchin Ghale Y., Tayanc M., Unal A.* Dried bottom of Urmia Lake as a new source of dust in the northwestern Iran: Understanding the impacts on local and regional air quality // Atmospheric Environment. 2021. V. 262. Article 118635. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118635>.
20. *Bouaziz M., Matschullat J., Gloaguen R.* Improved remote sensing detection of soil salinity from a semi-arid climate in Northeast Brazil // Comptes Rendus Géoscience. 2011. V. 343. No. 11–12. P. 795–803. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2011.09.003>.
21. *Gao Z., Li X., Zuo L. et al.* Unveiling soil salinity patterns in soda saline-alkali regions using Sentinel-2 and SDGSAT-1 thermal infrared data // Remote Sensing of Environment. 2025. V. 322. Article 114708. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114708>.
22. *Ghasempour R., Aalami M. T., Saghebian S. M., Ozgur Kirca V. S.* Analysis of spatiotemporal variations of drought and soil salinity via integrated multiscale and remote sensing-based techniques (Case study: Urmia Lake basin) // Ecological Informatics. 2024. V. 81. Article 102560. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102560>.

23. Gopi N. M., Annadurai R. A statistical approach to map saline and fluoride (F) affected areas using optical and microwave remote sensing data simulations: A case study in Palacode Taluk, Tamil Nadu, India // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2024. V. 35. Article 101207. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101207>.
24. Guo Y., Shi Z., Zhou L.-Q. et al. Integrating remote sensing and proximal sensors for the detection of soil moisture and salinity variability in coastal areas // *J. Integrative Agriculture*. 2013. V. 12. No. 4. P. 723–731. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60290-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60290-7).
25. Hall D. K., O’Leary D. S., DiGirolamo N. E. et al. The role of declining snow cover in the desiccation of the Great Salt Lake, Utah, using MODIS data // *Remote Sensing of Environment*. 2021. V. 252. Article 112106. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112106>.
26. IUSS Working Group WRB. World reference base for soil resources 2006: A framework for international classification, correlation and communication. World Soil Resources Reports No. 103. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy, 2006. 145 p.
27. IUSS Working Group WRB. World reference base for soil resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th ed. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022. 236 p.
28. Kazemi M., Asadi A., Feiznia S. et al. Transformations in a hypersaline lake: Examining the linkages between water level changes and Aeolian dust generation // *Environmental Research*. 2025. V. 271. Article 121090. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121090>.
29. Lopes C. L., Mendes R., Caçador I., Dias J. M. Assessing salt marsh extent and condition changes with 35 years of Landsat imagery: Tagus Estuary case study // *Remote Sensing of Environment*. 2020. V. 247. Article 111939. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111939>.
30. Mohamed S. A., Metwaly M. M., Metwalli M. R. et al. Integrating active and passive remote sensing data for mapping soil salinity using machine learning and feature selection approaches in arid regions // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. Article 1751. <https://doi.org/10.3390/rs15071751>.
31. Mulder V. L., de Bruin S., Schaepman M. E., Mayr T. R. The use of remote sensing in soil and terrain mapping — A review // *Geoderma*. 2011. V. 162. No. 1–2. P. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.018>.
32. Pouladi P., Nazemi A. R., Pouladi M. et al. Desiccation of a saline lake as a lock-in phenomenon: A socio-hydrological perspective // *Science of the Total Environment*. 2022. V. 811. Article 152347. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152347>.
33. Romanov A. N. (2019a) Dielectric behavior of sodic solonchak at 1.41 GHz in the south of Western Siberia // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2019. V. 57. No. 12. P. 9517–9523. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2927243>.
34. Romanov A. N. (2019b) Influence of water content and temperature on the dielectric and radio-emitting properties of the salt crust of puffy solonchak // *Eurasian Soil Science*. 2019. V. 52. No. 2. P. 171–179. <https://doi.org/10.1134/S1064229319020121>.
35. Romanov A. N., Khvostov I. V. Emissivity peculiarities of the inland salt marshes in the south of Western Siberia // *Intern. J. Remote Sensing*. 2018. V. 39. No. 2. P. 418–431. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2017.1385105>.
36. Romanov A. N., Bordonskiy G. S., Gurulev A. A. et al. On some features of diurnal dynamics of solonchak emissivity in summer // *Intern. J. Remote Sensing*. 2025. V. 46. No. 3. P. 1248–1256. <https://doi.org/10.1080/01431161.2024.2429780>.
37. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A. Mapping of sor depressions and solonchaks in the northern Caspian region based on long-term Landsat data // *Cosmic Research*. 2024. V. 62. Suppl. 1. P. S115–S123. <https://doi.org/10.1134/S0010952524601300>.
38. Stückemann K.-J., Waske B. Mapping Lower Saxony’s salt marshes using temporal metrics of multi-sensor satellite data // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022. V. 115. Article 103123. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103123>.
39. Sun C., Liu Y., Zhao S. et al., Classification mapping and species identification of salt marshes based on a short-time interval NDVI time-series from HJ-1 optical imagery // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2016. V. 45. Pt. A. P. 27–41. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.10.008>.
40. Tebbs E. J., Remedios J. J., Avery S. T. et al. Regional assessment of lake ecological states using Landsat: A classification scheme for alkaline–saline, flamingo lakes in the East African Rift Valley // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2015. V. 40. P. 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.03.010>.
41. Wang Z., Zhang F., Zhang X. et al. Regional suitability prediction of soil salinization based on remote-sensing derivatives and optimal spectral index // *Science of the Total Environment*. 2021. V. 775. Article 145807. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145807>.
42. Wang N., Peng J., Chen S. et al. Improving remote sensing of salinity on topsoil with crop residues using novel indices of optical and microwave bands // *Geoderma*. 2022. V. 422. Article 115935. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115935>.

43. Wang J., Yang T., Zhu K. et al. A novel retrieval model for soil salinity from CYGNSS: Algorithm and test in the Yellow River Delta // *Geoderma*. 2023. V. 432. Article 116417. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116417>.
44. Xiao Y., Hu W., Zhang Y. et al. Spatiotemporal variation and driving forces of soil salinization in the lower reach of arid endorheic basins: Critical role of lake system and groundwater overflow // *Agricultural Water Management*. 2025. V. 315. Article 109568. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109568>.
45. Zhang C., Gong Z., Qiu H. et al. Mapping typical salt-marsh species in the Yellow River Delta wetland supported by temporal-spatial-spectral multidimensional features // *Science of the Total Environment*. 2021. V. 783. Article 147061. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147061>.

Remote microwave solonchak water content indicator

A. N. Romanov

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul 656038, Russia
E-mail: romanov_alt@mail.ru

Hydrological changes associated with global warming and occurring in different regions of the globe with varying intensity lead to disruption of established ecosystems and significantly complicate socio-economic problems of the population. In arid and semi-arid zones of Northern Eurasia, negative consequences of these changes include climate aridization, reduced water availability in the territories, intensification of soil and hydrological droughts, partial or complete drying up of salt lakes and formation of salt marshes in their place. The paper describes the results of *in situ* and laboratory measurements of dielectric characteristics of soil taken from the surface of a soda gleyic solonchak formed on the drained part of a hypersaline soda lake. To be able to model the dielectric properties of a natural salt marsh, dielectric parameters of a chemically pure sample of mineral salt Na_2CO_3 and its aqueous solution were measured. The ability of a solonchak whose surface is salt crust when dry to change emissivity and brightness temperature is shown. A difference in brightness temperatures, reaching 100 K during one day, can be detected by remote microwave probing of the underlying surface. An algorithm for remote microwave monitoring of solonchaks by their radio-emitting parameters is proposed. A remote microwave indicator of solonchak water content is developed that can be used to detect solonchaks by remote microwave monitoring from unmanned aerial vehicles, small aircraft, and satellites.

Keywords: drying hypersaline lakes, salt marshes, radio-emitting characteristics, microwave range

Accepted: 04.07.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-302-314

References

1. Bazilevich N. I., *Geokhimiya pochv sodovogo zasoleniya* (Geochemistry of soda brining soils), Moscow: Nauka, 1965, 349 p. (in Russian).
2. Glushkova N. V., Chupina D. A., Pchel'nikov D. V., Boldyrev I. I., Selyatitskaya N. A., Mapping and monitoring of aridization processes in the south of the West Siberian Plain, *Geografiya i prirodnye resursy*, 2016, No. 1, pp. 133–140.
3. Kovda V. A., *Solonchaki i solontsy* (Solonchaks and solonetz), Leningrad: Izd. AN SSSR, 1937, 246 p. (in Russian)
4. Kovda V. A., *Proiskhozhdenie i rezhim zasolennykh pochv* (Origin and regime of saline soils), Iss. 1, Moscow; Leningrad: Izd. AN SSSR, 1946, 574 p. (in Russian).
5. Kovda V. A., *Problemy bor'by s opustynivaniem i zasoleniem oroshaemykh pochv* (Problems of combating desertification and salinization of irrigated soils), Moscow: Kolos, 1984, 304 p. (in Russian).
6. Komarov S. A., Mironov V. L., Romanov A. N., *Aerokosmicheskoe zondirovanie gidrologicheskogo sostoyaniya pochv radiofizicheskimi metodami* (Aerospace sounding of the hydrological state of soils by radiophysical methods), Barnaul: Izd. Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta, 1997, 104 p. (in Russian).

7. Lebedeva (Verba) M. P., Lopukhina O. V., Kalinina N. V., Features of the chemical and mineralogical composition of salts in sor solonchaks and lakes of the Kulunda steppe, *Pochvovedenie*, 2008, No. 4, pp. 467–480 (in Russian).
8. Lyamina V. A., Glushkova N. V., Smolentseva E. N., Zol'nikov I. D., Use of GIS and remote sensing methods for monitoring the area of lakes and solonchaks in the south of Western Siberia, *Interehkspo GEO-Sibir'*, 2010, V. 4, No. 2, pp. 3–7 (in Russian).
9. Pankova E. I., Saline soils of Russia: Solved and unsolved problems, *Pochvovedenie*, 2015, No. 2, pp. 131–144 (in Russian).
10. Pankova E. I., Gorokhova I. N., Analysis of data on the area of saline soils in Russia at the end of the 20th and beginning of the 21st centuries, *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V. V. Dokuchaeva*, 2020, No. 103, pp. 5–33 (in Russian).
11. Rabinovich V. A., Khavin Z. Ya., *Kratkii khimicheskii spravochnik* (Brief Chemical Handbook), 3rd ed., Leningrad: Khimiya, 1978, 392 p. (in Russian).
12. Romanov A. N., *Dielectric and radio-emitting properties of saline soils*, Barnaul, Izd. Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta, 2002, 118 p. (in Russian).
13. Romanov A. N., The influence of mass concentration of mineral salts on the dielectric characteristics of their aqueous solutions in the microwave range, *Radiotekhnika i elektronika*, 2004, V. 49, No. 9, pp. 1157–1163 (in Russian).
14. Trofimov I. A., Trofimova L. S., Yakovleva E. P., Remote indicators of land desertification, *Aridnye ehkossistemy*, 2015, V. 21, No. 1 (62), pp. 36–40 (in Russian).
15. Sharkov E. A., *Radioteplovoe distantsionnoe zondirovanie Zemli: fizicheskie osnovy. V 2 t., V. 1* (Radiothermal remote sensing of the Earth: Physical foundations, in 2 v., V. 1), Moscow: IKI RAN, 2014, 548 p. (in Russian).
16. Shutko A. M., *SVCh-radiometriya vodnoi poverkhnosti i pochvogruntov* (Microwave radiometry of water surface and soil), Moscow: Nauka, 1986, 190 p. (in Russian).
17. Aihaiti A., Nurmemet I., Yu X. et al., An enhanced soil salinity estimation method for arid regions using multisource remote sensing data and advanced feature selection, *Catena*, 2025, V. 256, Article 109116, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109116>.
18. Alizade Govarchin Ghale Y., Baykara M., Unal A., Investigating the interaction between agricultural lands and Urmia Lake ecosystem using remote sensing techniques and hydro-climatic data analysis, *Agricultural Water Management*, 2019, V. 221, pp. 566–579, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.05.028>.
19. Alizade Govarchin Ghale Y., Tayanc M., Unal A., Dried bottom of Urmia Lake as a new source of dust in the northwestern Iran: Understanding the impacts on local and regional air quality, *Atmospheric Environment*, 2021, V. 262, Article 118635, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118635>.
20. Bouaziz M., Matschullat J., Gloaguen R., Improved remote sensing detection of soil salinity from a semi-arid climate in Northeast Brazil, *Comptes Rendus Géoscience*, 2011, V. 343, No. 11–12, pp. 795–803, <https://doi.org/10.1016/j.crte.2011.09.003>.
21. Gao Z., Li X., Zuo L. et al., Unveiling soil salinity patterns in soda saline-alkali regions using Sentinel-2 and SDGSAT-1 thermal infrared data, *Remote Sensing of Environment*, 2025, V. 322, Article 114708, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114708>.
22. Ghasempour R., Aalami M. T., Saghebani S. M., Ozgur Kirca V. S., Analysis of spatiotemporal variations of drought and soil salinity via integrated multiscale and remote sensing-based techniques (Case study: Urmia Lake basin), *Ecological Informatics*, 2024, V. 81, Article 102560, <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102560>.
23. Gopi N. M., Annadurai R., A statistical approach to map saline and fluoride (F) affected areas using optical and microwave remote sensing data simulations: A case study in Palacode Taluk, Tamil Nadu, India, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2024, V. 35, Article 101207, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101207>.
24. Guo Y., Shi Z., Zhou L.-Q. et al., Integrating remote sensing and proximal sensors for the detection of soil moisture and salinity variability in coastal areas, *J. Integrative Agriculture*, 2013, V. 12, No. 4, pp. 723–731, [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60290-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60290-7).
25. Hall D. K., O'Leary D. S., DiGirolamo N. E. et al., The role of declining snow cover in the desiccation of the Great Salt Lake, Utah, using MODIS data, *Remote Sensing of Environment*, 2021, V. 252, Article 112106, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112106>.
26. *IUSS Working Group WRB, World reference base for soil resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication*, 2nd ed., World Soil Resources Reports No. 103, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy, 2006, 145 p.
27. *IUSS Working Group WRB, World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*, 4th ed., International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria, 2022, 236 p.

28. Kazemi M., Asadi A., Feiznia S. et al., Transformations in a hypersaline lake: Examining the linkages between water level changes and Aeolian dust generation, *Environmental Research*, 2025, V. 271, Article 121090, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121090>.
29. Lopes C. L., Mendes R., Caçador I., Dias J. M., Assessing salt marsh extent and condition changes with 35 years of Landsat imagery: Tagus Estuary case study, *Remote Sensing of Environment*, 2020, V. 247, Article 111939, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111939>.
30. Mohamed S. A., Metwaly M. M., Metwalli M. R. et al., Integrating active and passive remote sensing data for mapping soil salinity using machine learning and feature selection approaches in arid regions, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, Article 1751, <https://doi.org/10.3390/rs15071751>.
31. Mulder V. L., de Bruin S., Schaepman M. E., Mayr T. R., The use of remote sensing in soil and terrain mapping — A review, *Geoderma*, 2011, V. 162, No. 1–2, pp. 1–19, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.018>.
32. Pouladi P., Nazemi A. R., Pouladi M. et al., Desiccation of a saline lake as a lock-in phenomenon: A socio-hydrological perspective, *Science of the Total Environment*, 2022, V. 811, Article 152347, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152347>.
33. Romanov A. N. (2019a), Dielectric behavior of sodic solonchak at 1.41 GHz in the south of Western Siberia, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2019, V. 57, No. 12, pp. 9517–9523, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2927243>.
34. Romanov A. N. (2019b), Influence of water content and temperature on the dielectric and radio-emitting properties of the salt crust of puffy solonchak, *Eurasian Soil Science*, 2019, V. 52, No. 2, pp. 171–179, <https://doi.org/10.1134/S1064229319020121>.
35. Romanov A. N., Khvostov I. V., Emissivity peculiarities of the inland salt marshes in the south of Western Siberia, *Intern. J. Remote Sensing*, 2018, V. 39, No. 2, pp. 418–431, <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2017.1385105>.
36. Romanov A. N., Bordonskiy G. S., Gurulev A. A. et al., On some features of diurnal dynamics of solonchak emissivity in summer, *Intern. J. Remote Sensing*, 2025, V. 46, No. 3, pp. 1248–1256, <https://doi.org/10.1080/01431161.2024.2429780>.
37. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Mapping of sor depressions and solonchaks in the northern Caspian region based on long-term Landsat data, *Cosmic Research*, 2024, V. 62, Suppl. 1, pp. S115–S123, <https://doi.org/10.1134/S0010952524601300>.
38. Stüeckemann K.-J., Waske B., Mapping Lower Saxony's salt marshes using temporal metrics of multi-sensor satellite data, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, V. 115, Article 103123, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103123>.
39. Sun C., Liu Y., Zhao S. et al., Classification mapping and species identification of salt marshes based on a short-time interval NDVI time-series from HJ-1 optical imagery, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, V. 45, Pt. A, pp. 27–41, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.10.008>.
40. Tebbs E. J., Remedios J. J., Avery S. T. et al., Regional assessment of lake ecological states using Landsat: A classification scheme for alkaline–saline, flamingo lakes in the East African Rift Valley, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, V. 40, pp. 100–108, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.03.010>.
41. Wang Z., Zhang F., Zhang X. et al., Regional suitability prediction of soil salinization based on remote-sensing derivatives and optimal spectral index, *Science of the Total Environment*, 2021, V. 775, Article 145807, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145807>.
42. Wang N., Peng J., Chen S. et al., Improving remote sensing of salinity on topsoil with crop residues using novel indices of optical and microwave bands, *Geoderma*, 2022, V. 422, Article 115935, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115935>.
43. Wang J., Yang T., Zhu K. et al., A novel retrieval model for soil salinity from CYGNSS: Algorithm and test in the Yellow River Delta, *Geoderma*, 2023, V. 432, Article 116417, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116417>.
44. Xiao Y., Hu W., Zhang Y. et al., Spatiotemporal variation and driving forces of soil salinization in the lower reach of arid endorheic basins: Critical role of lake system and groundwater overflow, *Agricultural Water Management*, 2025, V. 315, Article 109568, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109568>.
45. Zhang C., Gong Z., Qiu H. et al., Mapping typical salt-marsh species in the Yellow River Delta wetland supported by temporal-spatial-spectral multidimensional features, *Science of the Total Environment*, 2021, V. 783, Article 147061, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147061>.