

Некоторые особенности поведения электрофизических и диэлектрических характеристик солончака с хлоридно-сульфатным типом почвенного засоления

А. Н. Романов

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

Солончаки, характеризующиеся высокой концентрацией минеральных солей, обладают особенно сильной агрессивностью к произрастающим на них растениям. Обезвоженная поверхность солончака представляет собой источник мелкодисперсных фракций минеральных солей, способных в результате ветрового переноса преодолевать значительные расстояния. Потенциальная опасность солончаков как источников химического загрязнения прилегающих территорий ставит первоочередной задачей разработку высокоточных оперативных методов диагностики экологического состояния солончаков на основе детального изучения их электрофизических и диэлектрических характеристик. Диэлектрические свойства солончаков зависят от совокупного влияния температуры, объёмной влажности, засоленности и типа почвенных солей. В данной работе изучены на частоте 50 МГц в летне-осенний период суточные вариации электропроводности, действительной и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) солончакового грунта с хлоридно-сульфатным типом почвенного засоления. В природных условиях зафиксированы случаи резкого возрастания электропроводности, действительной и мнимой части КДП солончакового грунта в течение короткого времени (10–20 мин) при повышении температуры окружающей среды. Причиной подобного поведения электропроводности и КДП может быть увеличение растворимости минеральных солей с ростом температуры. В результате этого изменяются ионный состав почвенной влаги и объёмная доля минеральных солей, находящихся в нерастворённом состоянии. По результатам натурных исследований рассчитаны зависимости электропроводности и КДП от температуры в диапазоне от -16 до $+29$ °С и объёмной влажности в интервале от 0,01 до $0,35 \text{ см}^3/\text{см}^3$.

Ключевые слова: солончаки, термодинамическая температура, объёмная влажность, электропроводность, комплексная диэлектрическая проницаемость, микроволновый диапазон

Одобрена к печати: 13.02.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-248-262

Введение

Спутниковая микроволновая радиометрия земных покровов, прошедшая долгий путь от первых радиометрических измерений (Башаринов и др., 1968, 1974; Попов и др., 1974; Schmugge et al., 1974) до современных космических платформ SMOS (*англ.* Soil Moisture Ocean Salinity) (Kerr et al., 2012), SMAP (*англ.* Soil Moisture Active Radiometer), МТВЗА-ГЯ (Модуль температурного и влажностного зондирования атмосферы — Геннадий Яковлевич (в честь Г. Я. Гуськова)) (Hoang et al., 2025; Kim et al., 2023), за более чем 60-летний период своего интенсивного развития зарекомендовала себя как высокоточный всепогодный метод сбора информации о состоянии подстилающей поверхности в скин-слое, пропорциональном длине волны регистрируемого микроволнового излучения (Li et al., 2022; Ma et al., 2019). Важными задачами были и остаются дистанционный мониторинг влажности почвенного покрова и солёности Мирового океана, морей, крупных минерализованных озёр (Harani et al., 2025; Kim et al., 2023; Xing et al., 2025).

На современном этапе развития методов спутниковой микроволновой радиометрии и радиометрической аппаратуры космического базирования заявленная разработчиками погрешность дистанционного определения влажности почвы со спутника SMOS не превышает $0,04 \text{ см}^3/\text{см}^3$ (Al-Yaari et al., 2017; Gruber et al., 2020). Однако точность дистанционного определения влажности снижается при попадании участков засоленных почв в диаграмму направленности антенн космического радиометра MIRAS (*англ.* Microwave Imaging Radiometer

with Aperture Synthesis), установленного на спутнике SMOS. Так, например, в работе (McColl et al., 2012) показано, что при использовании базового алгоритма SMOS Level 2 без учёта почвенного засоления весь бюджет погрешности SMOS будет обусловлен только засоленностью в зонах наблюдения SMOS при общей площади засоленных участков 25 % (возможно, даже значительно меньше). Следовательно, частичное засоление не может считаться несущественным фактором для микроволновых спутниковых миссий по измерению влажности почвы.

К перспективным направлениям развития дистанционных микроволновых методов зондирования земных покровов относится микроволновая радиометрия в Р-диапазоне (<0,3 ГГц), демонстрирующая перспективность в улучшении радиометрических миссий SMOS и SMAP, работающих в L-диапазоне (1,41 ГГц), для глобального мониторинга влажности почвы, особенно в районах с умеренной и густой растительностью (Shen et al., 2024). Использование радиометрии в Р-диапазоне позволяет измерять влажность почвы в более глубоких слоях (Brakhasi et al., 2024), но при этом Р-диапазон оказывается более чувствителен к засоленности почвы (Реутов, Шутко, 1990).

Возрастанию погрешности дистанционного определения влажности почвы способствуют: 1) непрекращающаяся последние несколько десятилетий полихимизация земель сельскохозяйственного назначения, вызванная чрезмерным внесением в почву химических соединений (минеральных удобрений, гербицидов и др.), присутствие которых в растворённом виде в почве ведёт к изменению её диэлектрических характеристик; 2) неоправданно высокие мелиоративные оросительные мероприятия и вызванное ими вторичное засоление почв. Согласно докладу FAO (*англ.* Food and Agriculture Organization) от 11 декабря 2024 г., суммарная площадь засоленных почв в настоящее время составляет около 1,381 млрд га (Global..., 2024).

Для уменьшения погрешности дистанционного определения влажности засоленной почвы проводятся исследования диэлектрических и радиоизлучательных характеристик засоленных почв; разрабатываются теоретические модели, учитывающие влияние растворённых в почвенной влаге минеральных солей на микроволновое излучение почвенного покрова (Armand et al., 1989; Chi et al., 2017; Dong L. et al., 2025; Jackson, O'Neill, 1987; Periasamy et al., 2020; Wan et al., 2023).

Среди засоленных почв особой агрессивностью к произрастающим на них растениям обладают солончаки, характеризующиеся высокой концентрацией растворённых солей (вплоть до образования корки соли на поверхности почвы). Диэлектрические и радиоизлучательные характеристики солончаков зависят от совокупного влияния термодинамической температуры (t), объёмной влажности (W_V), засоленности (Z) почв и типа почвенных солей.

В природных условиях сильная пространственно-временная зависимость от погодных условий ставит под сомнение дистанционное определение W_V с приемлемой точностью. В работе (Kleshchenko et al., 1998) представлены результаты измерений в микроволновом диапазоне диэлектрических характеристик грунтов, содержащих минеральную соль NaCl. Из анализа зависимостей комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) и коэффициента излучения от температуры, засоленности, объёмных долей связанной и свободной воды следует возможность дистанционного микроволнового мониторинга почв с хлоридно-натриевым засолением при отрицательной температуре окружающей среды. В публикациях (Романов, 2025; Romanov, 2019) даётся описание суточной динамики диэлектрических и радиоизлучательных характеристик содового солончака с преобладанием минеральной соли Na_2CO_3 и её кристаллогидратов $\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 10\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \times 1\text{H}_2\text{O}$ (ионов Na_2 , CO_3 , CO_3^{2-} , HCO_3^-).

В настоящей работе приведены результаты исследований суточной динамики в летне-осенний период физико-химических, электрофизических и диэлектрических характеристик солончакового грунта с хлоридно-сульфатным типом почвенного засоления.

Методика исследований

В качестве объекта исследования был выбран хлоридно-сульфатный солончак, прилегающий к супергалинному озеру Мормышанскому (рис. 1). Из рис. 1 видно, что по глубинному строению солончак имеет слоистую структуру, состоящую из трёх слоёв (отмечены цифрами 1, 2, 3). В слое 1 толщиной 0,3 см наблюдалось повышенное содержание соли, отложившейся на поверхности солончака. Слой 2 толщиной 0,3–5 см представлял собой донные отложения чёрного цвета (сульфидно-иловую лечебную грязь). Слой 3, коричневатого цвета, однородный, залегал глубже 5 см. Слои 2 и 3, относящиеся к супесчаным почвам, характеризуются разным гранулометрическим составом (табл. 1), а также различаются по ионному составу минеральных солей (табл. 2). Из табл. 2 видно, что ионный состав солей в солончаковом грунте изменяется по глубине и различен в разное время года. Грунтовые воды залегали на глубине 20–30 см. Минерализация грунтовой воды достигала 150 г/л с преобладанием ионов Na и Cl.



Рис. 1. Карта-схема солончака, расположенного в береговой зоне Мормышанского озера (а), и глубинное строение солончака (б). Шестиугольник красного цвета — участок исследований и место отбора проб солончакового грунта; 1, 2, 3 — номера слоёв

Таблица 1. Гранулометрический состав солончакового грунта (в %)

Слой	Глубина отбора, см	Размер частиц, мм						Сумма (<0,01)
		1,00–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,010–0,005	0,005–0,001	Ил (<0,001)	
2	0,3–5 см	4,05	61,79	19,68	1,24	2,24	11,00	14,48
3	5–10 см	4,65	73,03	11,16	0,08	1,12	9,96	11,16

В летний период температура окружающей среды достигает 36 °С. На обезвоженной поверхности солончака откладывается слой минеральных солей. В степной зоне нередки сильные ветры, поэтому мелкодисперсные фракции солей могут разноситься на большие расстояния. Так как в непосредственной близости от озера располагаются населённый пункт и попу-

лярный туристско-рекреационный центр с высокой посещаемостью туристов из Алтайского края и других регионов Сибири, то воздушный перенос токсичных солей с иссушённой поверхности солончака может представлять серьёзную опасность для здоровья проживающего поблизости населения.

Таблица 2. Ионный состав солончакового грунта в разные периоды года

Дата отбора	Слой	CO ₃ ²⁻ , мг/кг	HCO ₃ ⁻ , мг/кг	Cl ⁻ , мг/кг	SO ₄ ²⁻ , мг/кг	Ca ²⁺ , мг/кг	Mg ²⁺ , мг/кг	Na ⁺ +K ⁺ , мг/кг	Сумма солей, мг/кг
28.07.2025	1	600,0	3324,5	23856,0	5596,5	120,0	1152,0	17726,0	52375,0
	2	60,0	1067,5	9471,0	2272,6	50,0	318,0	7094,2	20333,3
	3	90,0	1006,5	17381,0	3516,0	80,0	420,0	12658,0	35151,5
29.11.2025	1	240,0	1403,0	6 489,0	2686,4	90,0	354,0	5482,4	16744,9
	2	180,0	640,5	10689,0	3452,0	100,0	384,0	8206,8	23652,3
	3	45,0	686,3	10164,0	2534,0	80,0	264,0	7588,7	21362,0

Примечание: 1 — 0–0,3 см (корка соли); 2 — 0,3–5 см (грунт); 3 — 5–10 см (грунт).

В ходе исследований проводили отбор проб солончакового грунта с разной глубины, в зависимости от количества слоёв и их размеров. В лабораторных условиях определяли плотность сухого ($\rho_{\text{сух}}$) и влажного ($\rho_{\text{влаж}}$) грунта, массовую (W_M , г/г) и объёмную (W_V , см³/см³) влажность, а также массовую концентрацию и ионный состав минеральных солей (табл. 2). Связь между W_M и W_V имеет следующий вид: $W_V = (\rho_{\text{влаж}}/\rho_{\text{воды}})W_M$ ($\rho_{\text{воды}} \approx 1$ г/см³). Значения $\rho_{\text{влаж}}$ и $\rho_{\text{сух}}$ рассчитывали по известным формулам $\rho_{\text{влаж}} = M/V$; $\rho_{\text{сух}} = M_{\text{сух}}/V$; $M = M_{\text{сух}} + M_{\text{воды}}$; M , $M_{\text{сух}}$, $M_{\text{воды}}$ — масса влажной, сухой почвы и воды; V — единичный объём сухой и влажной почвы. Значения W_M , W_V определяли гравиметрическим способом, общепринятым в сельскохозяйственной практике (Reynolds, 1970). Величина W_V включает в себя объёмные доли связанной воды ($W_{\text{связ}}$) и свободной ($W_{\text{своб}}$), резко различающиеся по диэлектрическим характеристикам (Boyarskii et al., 2002). Связанная вода, сорбированная на поверхности почвенных частиц, не растворяет соль и недоступна растениям. Для супесчаных почв $W_{\text{связ}} = 0,05$ см³/см³ (Комаров и др., 1997).

Электрофизические и диэлектрические характеристики измеряли в полевых условиях методом коаксиальной импедансной диэлектрической рефлектометрии с помощью портативного датчика Stevens HydraGO. Датчик подключался к сотовому телефону по Bluetooth с помощью приложения HydraGO. Зубцы датчика длиной 6 см обеспечивают измерение объёмной электропроводности почвы EC_{bulk} (англ. Bulk Electrical Conductivity), электропроводности поровой влаги EC_{pw} (англ. Pore Water Electrical Conductivity) и температуры (t , °C) с погрешностями не более $\pm 0,02$ См/м и $\pm 0,3$ °C соответственно (Dong Y. et al., 2025; Wang et al., 2024; Wilson et al., 2024). Электропроводность EC_{pw} , отражающая содержание растворимых солей в почвенном растворе и доступность воды для растений, используется как сельскохозяйственный стандарт. Величина EC_{bulk} отражает общую засоленность почвы, учитывая влияние растворимых и нерастворимых солей (Johnson et al., 2005). Одновременно с EC_{bulk} и EC_{pw} проводятся измерения действительной (ϵ') и мнимой (ϵ'') части КДП почвогрунта. На основе ϵ' и ϵ'' рассчитан тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta = \epsilon'/\epsilon''$.

Результаты исследований

На рис. 2 (см. с. 252) приведены графики суточной динамики физических характеристик поверхности солончака в слое 0–5 см. Видно, что массовая влажность W_M (график 3) в пределах погрешности изменяется незначительно. В то же время значения $\rho_{\text{сух}}$, $\rho_{\text{влаж}}$ (графики 1 и 2),

W_V (график 4) претерпевают более заметные изменения, связанные с подтягиванием почвенной воды с растворёнными в ней солями в поверхностный слой солончака и её последующим испарением, в результате чего часть солей остаётся на поверхности в обезвоженном состоянии. Заметные изменения W_V , $\rho_{\text{влаж}}$ и $\rho_{\text{сух}}$ наблюдаются в дневное время суток, что может быть связано с повышением температуры поверхности солончака вследствие её нагрева солнцем. Экспериментально установленные зависимости $\rho_{\text{влаж}}(\rho_{\text{сух}})$ и $W_V(\rho_{\text{влаж}})$ (графики 5 и 6) для солончакового грунта, аппроксимированные прямыми линиями, имеют следующий вид:

$$\rho_{\text{влаж}} = (0,15 \pm 0,04) + (1,08 \pm 0,02)\rho_{\text{сух}}, \quad R = 0,99, \quad \sigma = 0,01, \quad 1,35 \leq \rho_{\text{сух}} \leq 1,8 \text{ г/см}^3, \quad (2)$$

$$W_V = (0,127 \pm 0,04) + (0,08 \pm 0,02)\rho_{\text{влаж}}, \quad R = 0,65, \quad \sigma = 0,01, \quad 1,6 \leq \rho_{\text{сух}} \leq 2,1 \text{ г/см}^3. \quad (3)$$

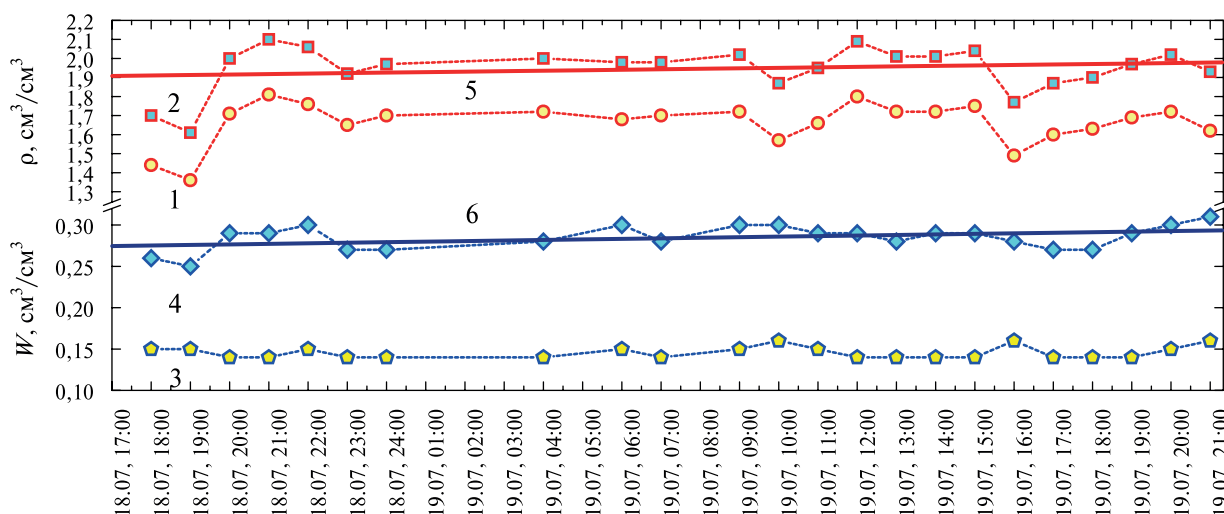


Рис. 2. Суточная динамика влажности и плотности солончакового грунта в слое 0–5 см: 1, 2 — плотность сухого и влажного образцов солончакового грунта; 3, 4 — массовая и объёмная влажность солончака; 5, 6 — эмпирические зависимости (1) и (2)

Зависимости (1) и (2) позволяют по одной известной величине оценить значения двух других параметров. Это может значительно снизить трудоёмкость полевых работ. При этом следует иметь в виду, что численные коэффициенты в соотношениях (1) и (2) могут различаться для почв с разной засоленностью и типом солей.

На рис. 3а (см. с. 253) приведены графики суточной динамики температуры t (см. рис. 3а, 1), суточной динамики EC_{bulk} (см. рис. 3а, 2) и EC_{PW} (см. рис. 3а, 3). В период эксперимента суточные вариации t достигали 12 °С. Видно, что при изменении t изменяются значения EC_{PW} и EC_{bulk} . Заметные изменения EC_{PW} и EC_{bulk} , зарегистрированные в эксперименте в период времени с 11:00 до 17:00, происходившие в течение короткого времени, могли быть вызваны наличием (отсутствием) облачности и прямым нагревом солончаковой поверхности солнечными лучами, а также достижением температуры $t = 29 \pm 0,3$ °С, близкой к температуре плавления кристаллогидрата $\text{CaCl}_2 \times 6\text{H}_2\text{O}$ $t = 29,8$ °С (Рабинович, Хавин, 1978). При плавлении кристаллогидратов высвобождается кристаллизационная вода и образуется насыщенный раствор с резко отличными диэлектрическими параметрами. Соответственно, изменяются объёмные доли кристаллизационной и свободной воды в солончаковом грунте.

На рис. 3б приведена суточная динамика t (см. рис. 3б, 1), ϵ' (см. рис. 3б, 2) и ϵ'' (см. рис. 3б, 3) солончакового грунта. Видно, что для ϵ' и ϵ'' в этот временной период также наблюдаются заметные изменения. Это может быть связано с тем, что в диапазоне значений температуры 20–29 °С возрастает растворимость солей Na_2CO_3 , Na_2SO_4 , MgSO_4 , MgCl_2 , CaCl_2 , которые могут образовываться при высыхании солончака (Рабинович, Хавин, 1978).

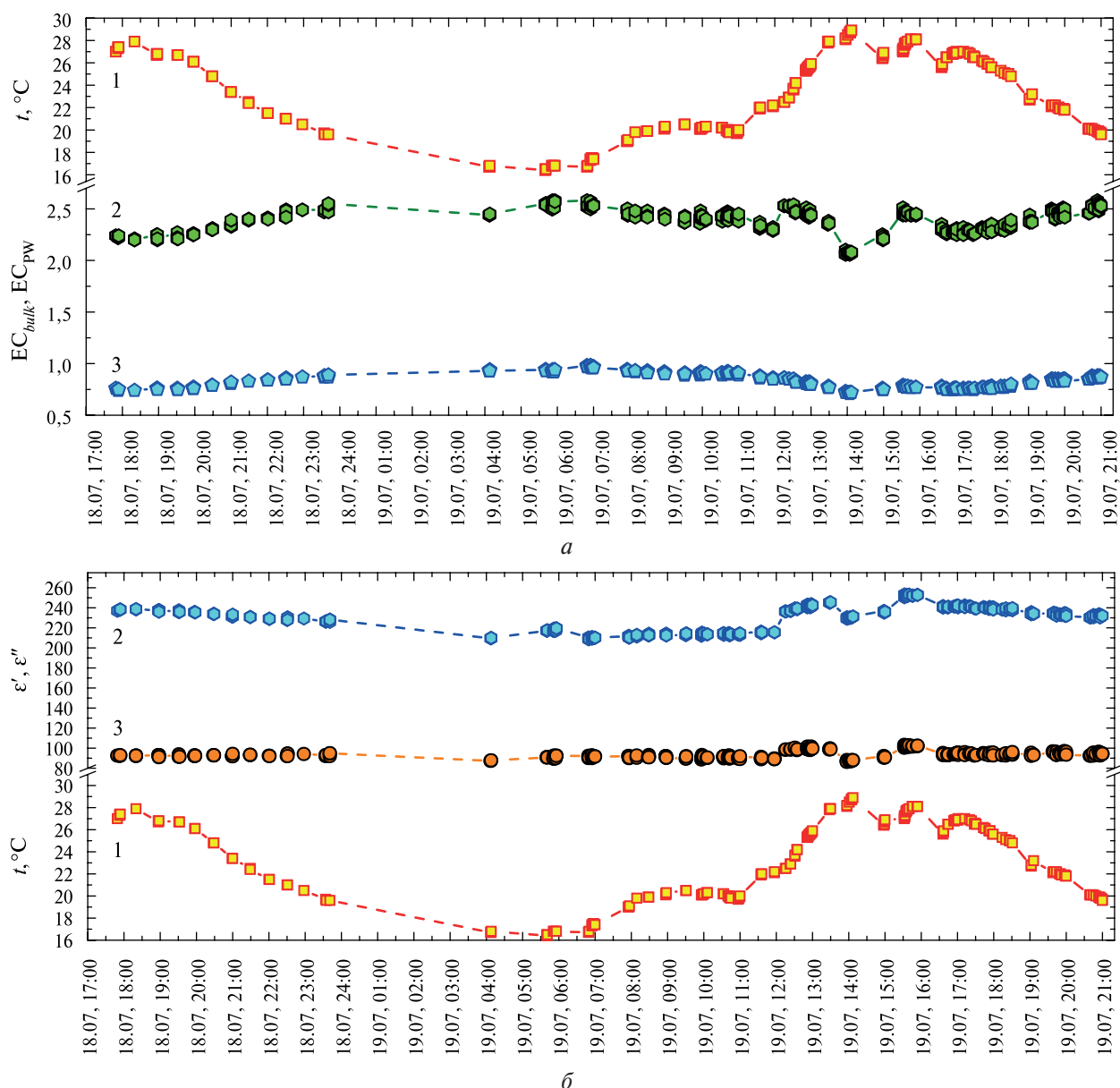


Рис. 3. Суточная динамика характеристик солончакового грунта на частоте 50 МГц: а — t (1), ϵ'_{bulk} (2), ϵ'_{pw} (3); б — t (1), ϵ' (2) и ϵ'' (3)

В интервале отрицательной температуры вариации величин ϵ'_{pw} , ϵ'_{bulk} (рис. 4а, см. с. 254), ϵ' , ϵ'' (см. рис. 4б) и $\text{tg}\delta$ (см. рис. 4в) наиболее заметны в диапазоне от -12 до -6 °С. Менее сильные вариации указанных параметров наблюдаются в интервале от -16 до -12 °С. Подобное поведение электрофизических и диэлектрических характеристик солончакового грунта может быть связано с образованием солёного льда из водно-солевого раствора с высокой концентрацией растворённых солей (в данном случае до 135 г/кг, табл. 2).

Обсуждение

От соотношения между t , W_v , Z зависят растворимость минеральных солей, скорость испарения почвенной влаги, объёмные доли связанной, кристаллизационной и свободной воды, в соответствии с чем изменяются концентрация солей в почвенном растворе и доля солей, выпавших в осадок. Величины t , W_v определяются погодными условиями, характеризуются суточной и сезонной динамикой. При отрицательной температуре окружающей среды

в солончаковом грунте возможно появление дополнительной компоненты — солёного льда, диэлектрические характеристики которого, зависящие от концентрации соли, отличаются от диэлектрических характеристик грунта, воды и пресноводного льда (Романов, 2002; Moore, Fujita, 1993).

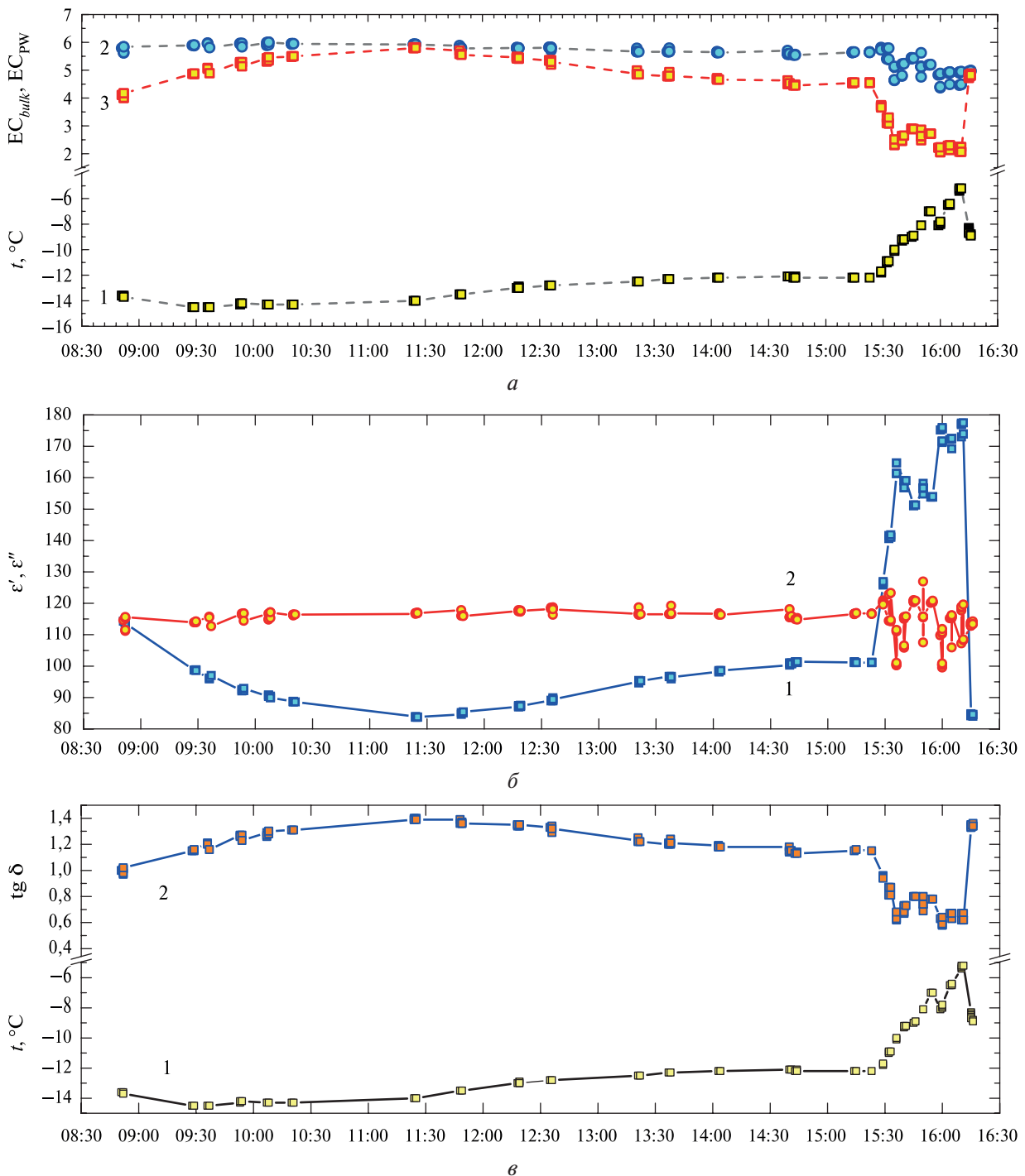


Рис. 4. Вариации характеристик солончакового грунта (29.11.2025):
 а — t (1), EC_{bulk} (2), EC_{PW} (3), t (1); б — ϵ' (1), ϵ'' (2); в — t (1), $tg\delta$ (2)

Из приведённых экспериментальных данных следует, что суточные вариации, наблюдаемые в летний период, особенно в дневное время, могут существенно затруднить дистанционный экологический мониторинг солончаков с приемлемой точностью. В связи с этим воз-

никает необходимость поиска новых подходов к снижению неопределённости в оценке электрофизических и диэлектрических характеристик при мониторинге солончаков.

Анализ зависимостей проводился с использованием полиномов 1, 2, 3-й степени с выбором аппроксимирующей функции с наименьшей средней квадратической погрешностью. Для исследуемого солончакового грунта с $WV = 0,015 \text{ см}^3/\text{см}^3$ в диапазоне температуры от -6 до $+55 \text{ }^\circ\text{C}$ величины EC_{bulk} , EC_{PW} , ϵ'' оказались близки к нулю из-за того, что вся вода была в связанном состоянии и не растворяла соль. Диэлектрические характеристики сухой почвы и солей, находящихся в обезвоженном состоянии, от температуры не зависят (Романов, 2002). В то же время от температуры зависят диэлектрические характеристики связанной воды (Komarov et al., 1999). Зависимость $\epsilon'(t)$ была аппроксимирована прямой линией, имеющей вид:

$$\epsilon' = (2,91 \pm 0,004) + (0,011 \pm 0,0001)t, \quad R = 0,982, \quad \sigma = 0,04.$$

Для солончакового грунта с объёмной влажностью в диапазоне $W_V = 0,25 \dots 0,35 \text{ см}^3/\text{см}^3$ зависимости $EC_{bulk}(t)$, $EC_{PW}(t)$ (рис. 5а, см. с. 256), $\epsilon'(t)$, $\epsilon''(t)$ (см. рис. 5б) и $\text{tg}\delta(t)$ (см. рис. 5в), аппроксимированные полиномами 1, 2, 3-го порядка, имеют вид:

$$Y = A_0 + A_1t + A_2t^2 + A_3t^3, \quad (3)$$

где A_0, A_1, A_2, A_3 — эмпирические коэффициенты, приведённые в табл. 3.

Установленные эмпирические зависимости $EC_{bulk}(t)$, $EC_{PW}(t)$ позволяют по измеренной температуре оценивать величины EC_{bulk} , EC_{PW} , используемые в сельскохозяйственной практике в качестве сельскохозяйственных стандартов, применяемых для оценки содержания растворимых солей в почвенном растворе и доступности воды растениям. Зависимости $\epsilon'(t)$, $\epsilon''(t)$ могут быть применены для оценки возможности и перспективности использования Р-диапазона в целях экологического мониторинга солончаков.

Таблица 3. Эмпирические коэффициенты в формуле (3)

Y	A_0	A_1	A_2	A_3	R	σ
EC_{bulk}	4,01	-0,111	0,111	—	0,985	0,98
EC_{PW}	1,51	-0,113	0,00743	$-1,6 \cdot 10^{-4}$	0,957	0,30
ϵ'	189	3,2	-0,186	0,0052	0,956	10,3
ϵ''	107,9	-0,61	—	—	-0,86	5,4
$\text{tg}\delta$	0,54	-0,0218	0,00144	$-3,1 \cdot 10^{-6}$	0,928	0,074

В значительной мере диэлектрические характеристики солончакового грунта зависят от объёмной влажности, определяющей количество солей, находящихся в растворённом, нерастворённом состоянии или в виде кристаллогидрата. На рис. 6а приведена зависимость электропроводности почвы (EC_{bulk}) от объёмной влажности (при температуре $t = +25 \text{ }^\circ\text{C}$), аппроксимированная прямой линией, имеющей вид (график 3):

$$EC_{bulk} = (0,24 \pm 0,25) + (9,9 \pm 1,6)W_V, \quad R = 0,89, \quad \sigma = 0,5.$$

Для электропроводности поровой влаги (EC_{PW}) построить подобную зависимость с приемлемой погрешностью затруднительно, так как присутствующие в солончаковом грунте минеральные соли вступают во взаимодействие с почвенной влагой и образуют промежуточные химические соединения — кристаллогидраты, характеризующиеся отличными от воды и почвы диэлектрическими свойствами (Романов, 2002).

На рис. 6б (см. с. 257) приведены зависимости действительной (см. рис. 6б, 1) и мнимой (см. рис. 6б, 2) части КДП солончакового грунта от WV , аппроксимированные следующими зависимостями:

$$\epsilon' = -2 - 22W_V + 2544W_V^2, \quad R = 0,93, \quad \sigma = 27,$$

$$\epsilon'' = 10,6 + 411W_V, \quad R = 0,90, \quad \sigma = 20.$$

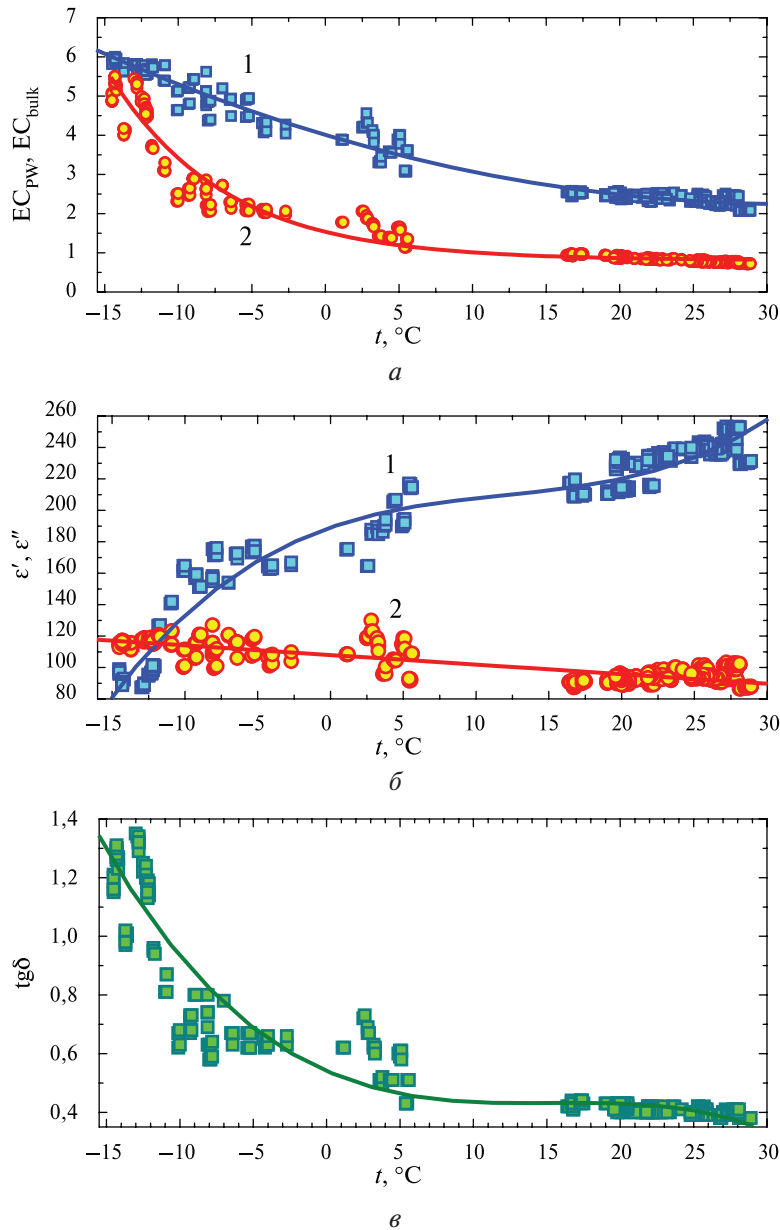


Рис. 5. Зависимости характеристик солончакового грунта от температуры:

$a - EC_{bulk}$ (1), EC_{pw} (2); $б - \epsilon'$ (1), ϵ'' (2); $в - tg\delta$

При одной и той же температуре $t = 25 \pm 0,2$ °C возрастание WV от 0 до $0,35 \text{ см}^3/\text{см}^3$ означает, что в солончаковом грунте происходит последовательное изменение компонентного состава с образованием кристаллогидратов и их растворением, образованием водно-солевого раствора с разной концентрацией растворённых веществ. Таким образом, зависимости $\epsilon'(W)$ и $\epsilon''(W)$ учитывают весь цикл физико-химических преобразований и изменений компонентного состава, происходящих с солончаковым грунтом.

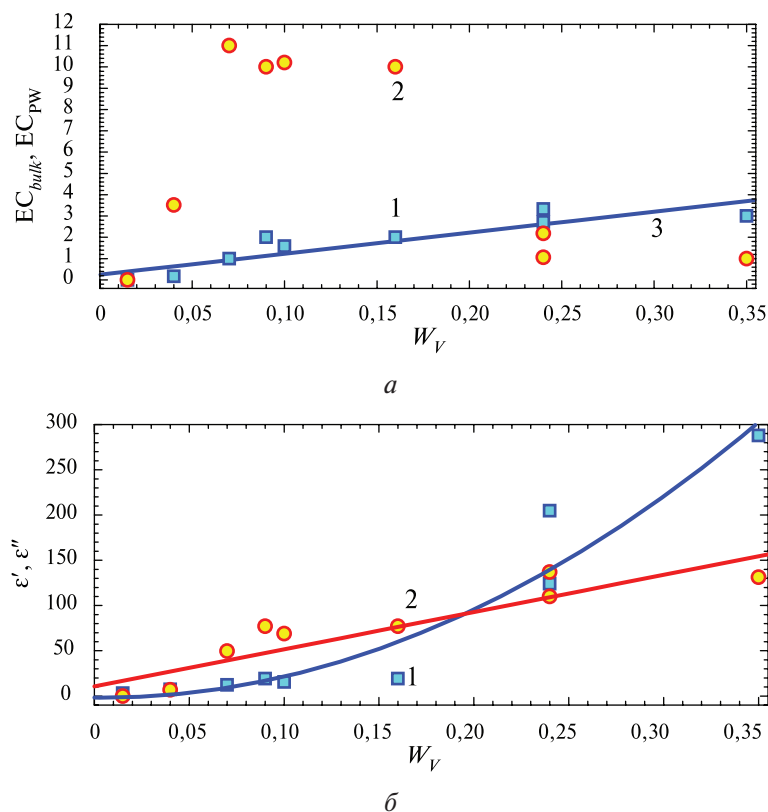


Рис. 6. Зависимости характеристик солончакового грунта от объёмной влажности: а — EC_{bulk} (1), EC_{pw} (2); б — ϵ' (1), ϵ'' (2)

Заключение

В результате проведённых натуральных и лабораторных исследований получены следующие результаты.

В летне-осенний период изучена суточная динамика электрофизических и диэлектрических характеристик хлоридно-сульфатного солончака. Установлены новые зависимости электропроводности и КДП от термодинамической температуры и объёмной влажности солончакового грунта. Приведённые данные могут быть использованы для моделирования электрофизических, диэлектрических и излучательных характеристик солончаков. При мониторинге солончаков с известным ионным составом и температурой окружающей среды (поверхности солончака) могут быть рассчитаны значения EC_{pw} , EC_{bulk} , ϵ' , ϵ'' , $\text{tg}\delta$, что позволяет оценить экологическое состояние солончаков и спрогнозировать их влияние на окружающую среду.

Установленные соотношения дают возможность на основе измеренных дистанционным или контактным способом температуры и объёмной влажности определять электрофизические и диэлектрические характеристики солончакового грунта. В свою очередь, оценённые электрофизические и диэлектрические характеристики солончакового грунта могут быть использованы для экологического мониторинга солончаков и прогнозирования негативных климатических и гидрологических процессов, связанных с усыханием гиперсолёных озёр, расширением площадей солончаков, аридизацией климата, отложением на поверхности солончака мелкодисперсных фракций минеральных солей, представляющих опасность для жителей близлежащих населённых пунктов.

Приведённые в статье численные значения гранулометрического состава солончаковых грунтов на разных глубинах, а также ионного состава солей, полученные в результате натуральных исследований, могут быть использованы для теоретического моделирования электрофизических и диэлектрических характеристик солончаковых грунтов, поиска новых подходов

к разработке методов мониторинга экологического состояния солончаков. Установленная суточная динамика комплексной диэлектрической проницаемости может найти применение при калибровке и валидации данных спутникового зондирования. Важной задачей, не нашедшей отражения в данной статье, является изучение суточной динамики и анализ изменений электрофизических и диэлектрических параметров при промерзании солончакового грунта и образовании на его поверхности сезонно-мёрзлого слоя разной толщины, сопоставимой со скин-слоем, что может вызвать интерференцию микроволнового излучения.

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. Башаринов А. Е., Тучков Л. Т., Поляков В. М., Ананов Н. И. Измерение радиотепловых и плазменных излучений. М.: Советское радио, 1968. 390 с.
2. Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука, 1974. 187 с.
3. 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.
4. Попов А. Е., Шарков Е. А., Эткин В. С. Характеристики излучения влажных грунтов в СВЧ-диапазоне // Метеорология и гидрология. 1974. № 10. С. 49–57.
5. Рабинович В. А., Хавин З. Я. Краткий химический справочник. Л.: Химия, 1978. 356 с.
6. Реутов Е. А., Шутко А. М. Экспериментальные исследования СВЧ-излучения засоленных почв // Исслед. Земли из космоса. 1990. № 4. С. 78–84.
7. Романов А. Н. Диэлектрические и радиоизлучательные свойства засоленных почв. Барнаул: Изд-во Алтайского гос. ун-та, 2002. 118 с.
8. Романов А. Н. Дистанционный микроволновый индикатор обводнённости солончака // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 4. С. 302–314. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-302-314.
9. Al-Yaari A., Wigneron J.-P., Kerr Y. et al. Evaluating soil moisture retrievals from ESA's SMOS and NASA's SMAP brightness temperature datasets // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 193. P. 257–273. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.010>.
10. Armand N. A., Reutov E. A., Shutko A. M. Microwave radiometry of saline soils // Remote Sensing Applications. 1989. P. 19–28.
11. Boyarskii D. A., Tikhonov V. V., Komarova N. Yu. Model of dielectric constant of bound water in soil for applications of microwave remote sensing // Progress in Electromagnetics Research. 2002. V. 35. P. 251–269.
12. Brakhasi F., Walker J. P., Judge J. et al. Soil moisture profile estimation under bare and vegetated soils using combined L-band and P-band radiometer observations: An incoherent modeling approach // Remote Sensing of Environment. 2024. V. 307. Article 114148. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114148>.
13. Chi T., Li B., Mu L., Cao G. Application study of the microwave emissivity spectra in the estimation of salt content of saline soil // Procedia Computer Science. 2017. V. 107. P. 727–732. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.03.155>.
14. Dong L., Wang W., Che T. et al. Simultaneous retrieval of soil moisture and salinity in arid and semiarid regions using Sentinel-1 data and a revised dielectric model for salty soil // Agricultural Water Management. 2025. V. 312. Article 109410. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109410>.
15. Dong Y., Tucker S., Singh G. et al. Optimizing soil moisture sensor placement through spatial variability analysis in Orchards // Smart Agricultural Technology. 2025. V. 12. Article 101273. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101273>.
16. Global status of salt-affected soils — Main report. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024. 240 p. <https://doi.org/10.4060/cd3044en>.
17. Gruber A., De Lannoy G., Albergel C. et al. Validation practices for satellite soil moisture retrievals: What are (the) errors? // Remote Sensing of Environment. 2020. V. 244. Article 111806. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111806>.
18. Harani P., Gautam S., Joshi S. K. et al. Advancements in soil moisture estimation through integration of remote sensing and artificial intelligence techniques // Science of the Total Environment. 2025. V. 1001. Article 180503. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180503>.

19. *Hoang T. P., Ha M. C., Vu P. L. et al.* Integrating SMAP and CYGNSS data for daily soil moisture and agricultural drought monitoring in Nghe An province, Vietnam // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2025. V. 39. Article 101664. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101664>.
20. *Jackson T. J., O'Neill P. E.* Salinity effects on the microwave emission of soils // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 1987. V. GE-25. No. 2. P. 214–220. DOI: 10.1109/TGRS.1987.289820.
21. *Johnson C. K., Eigenberg R. A., Doran J. W. et al.* Status of soil electrical conductivity studies by central state researchers // *Trans. American Soc. of Agricultural Engineers*. 2005. V. 48, No. 3. P. 979–989. DOI: 10.13031/2013.18510.
22. *Kerr Y. H., Waldteufel P., Richaume P. et al.* The SMOS soil moisture retrieval algorithm // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2012. V. 50. No. 5. P. 1384–1403. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2184548.
23. *Kim H., Crow W., Li X. et al.* True global error maps for SMAP, SMOS, and ASCAT soil moisture data based on machine learning and triple collocation analysis // *Remote Sensing of Environment*. 2023. V. 298. Article 113776. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113776>.
24. *Kleshchenko V. N., Komarov S. A., Mironov V. L., Romanov A. N.* Dielectric properties of salted grounds in microwave band // *Proc. 1998 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'98)*. V. 2. IEEE, 1998. P. 992–994. DOI: 10.1109/IGARSS.1998.699650.
25. *Komarov S. A., Mironov V. L., Romanov A. N.* Frequency dispersion in microwave for complex permittivity of bound water stored in soils and wet salts // *Proc. 1999 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'99)*. V. 5. IEEE, 1999. P. 2643–2645.
26. *Li X., Wigneron J.-P., Frappart F. et al.* The first global soil moisture and vegetation optical depth product retrieved from fused SMOS and SMAP L-band observations // *Remote Sensing of Environment*. 2022. V. 282. Article 113272. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113272>.
27. *Ma H., Zeng J., Chen N. et al.* Satellite surface soil moisture from SMAP, SMOS, AMSR2 and ESA CCI: A comprehensive assessment using global ground-based observations // *Remote Sensing of Environment*. 2019. V. 231. Article 111215. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111215>.
28. *McCull K. A., Ryu D., Matic V. et al.* Soil salinity impacts on L-band remote sensing of soil moisture // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2012. V. 9. No. 2. P. 262–266. DOI: 10.1109/LGRS.2011.2165932.
29. *Moore J. C., Fujita S.* Dielectric properties of ice containing acid and salt impurity at microwave and low frequencies // *J. Geophysical Research: Solid Earth*. 1993. V. 98. P. 9769–9780. <https://doi.org/10.1029/93JB00710>.
30. *Periasamy S., Ravi K. P.* A novel approach to quantify soil salinity by simulating the dielectric loss of SAR in three-dimensional density space // *Remote Sensing of Environment*. 2020. V. 251. Article 112059. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112059>.
31. *Reynolds S. G.* The gravimetric method of soil moisture determination. Part I. A study of equipment, and methodological problems // *J. Hydrology*. 1970. V. 11. No. 3. P. 258–273. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90066-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90066-1).
32. *Romanov A. N.* 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. DOI: 10.1109/TGRS.2019.2927243.
33. *Schmugge T., Gloersen P., Wilheit T., Geiger F.* Remote sensing of soil moisture with microwave radiometers // *J. Geophysical Research: Solid Earth and Planets*. 1974. V. 79. No. 2. P. 317–323. DOI: 10.1029/JB079i002p00317.
34. *Shen X., Fan L., Zuo T. et al.* P-band radiometry for enhanced vegetation optical depth (VOD) and soil moisture retrieval in dense crop canopies // *Remote Sensing of Environment*. 2024. V. 313. Article 114353. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114353>.
35. *Wan H., Qi H., Shang S.* Estimating soil water and salt contents from field measurements with time domain reflectometry using machine learning algorithms // *Agricultural Water Management*. 2023. V. 285. Article 108364. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108364>.
36. *Wang W., Ma C., Wang X. et al.* A soil moisture experiment for validating high-resolution satellite products and monitoring irrigation at agricultural field scale // *Agricultural Water Management*. 2024. V. 304. Article 109071. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109071>.
37. *Wilson T. B., Kochendorfer J., Diamond H. J. et al.* Evaluation of soil water content and bulk electrical conductivity across the U. S. Climate Reference Network using two electromagnetic sensors // *Vadose Zone J.* 2024. V. 23. No. 4. Article e20336. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20336>.
38. *Xing M., Cui K., Dong T. et al.* Improved soil moisture retrieval during crop growing season using passive microwave data at L-band // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2025. V. 143. Article 104788. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104788>.

Some behavior features of electrophysical and dielectric characteristics of solonchak with chloride-sulfate type of soil salinization

A. N. Romanov

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul 656038, Russia

E-mail: romanov_alt@mail.ru

Solonchaks, characterized by high concentration of mineral salts, are particularly aggressive to plants growing there. The dehydrated surface of a solonchak is a source of finely dispersed fractions of mineral salts, which can travel significant distances due to wind transport. The potential danger of solonchaks as sources of chemical pollution in adjacent areas makes it a priority to develop highly accurate operational methods for diagnosing the ecological state of solonchaks based on a detailed study of their electrophysical and dielectric properties. The dielectric properties of solonchaks depend on the combined effects of temperature, volumetric moisture, salinity, and type of soil salts. In this study, diurnal variations in electrical conductivity and real and imaginary parts of the complex dielectric permittivity of solonchak soil with chloride-sulfate soil salinity were studied at a frequency of 50 MHz during the summer-autumn period. *In situ* studies showed sharp increases in electrical conductivity and real and imaginary parts of complex dielectric permittivity of solonchak soils over a short period of time (10–20 minutes) with increasing ambient temperature. This behavior of electrical conductivity and complex dielectric permittivity may be due to the increase in solubility of mineral salts with temperature. This results in changes in the ionic composition of soil moisture and the volume fraction of undissolved mineral salts. Based on the results of *in situ* studies, the dependences of electrical conductivity and complex permittivity on temperature in the range of -16 to $+29$ °C and volumetric moisture in the range of 0.01 to 0.35 cm³/cm³ were calculated.

Keywords: solonchaks, thermodynamic temperature, volumetric moisture, electrical conductivity, complex permittivity, microwave range

Accepted: 13.02.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-248-262

References

1. Basharinov A. E., Tuchkov L. T., Polyakov V. M., Ananov N. I., *Izmerenie radioteplovykh i plazmennyykh izlucheni* (Measurement of radiothermal and plasma radiation in the microwave band), Moscow: Sovetskoe radio, 1968, 320 p. (in Russian).
2. Basharinov A. Ye., Gurvich A. S., Egorov S. T., *Radioizluchenie Zemli kak planety* (Radio emission of the Earth as a planet), Moscow: Nauka, 1974, 188 p. (in Russian).
3. Komarov S. A., Mironov V. L., Romanov A. N., *Aehrokosmicheskoe zondirovanie gidrologicheskogo sostoyaniya pochv radiofizicheskimi metodami* (Aerospace sensing of the hydrological state of soils by radiophysical methods), Barnaul: Izd. Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta, 1997, 104 p. (in Russian).
4. Popov A. E., Sharkov E. A., Etkin V. S., Characteristics of radiation of wet soils in the microwave range, *Meteorology and hydrology*, 1974, No. 10, pp. 49–57 (in Russian).
5. Rabinovich V. A., Havin Z. Ya., *Kratkii khimicheskii spravochnik* (Brief chemical handbook), Leningrad: Khimiya, 1978, 356 p. (in Russian).
6. Reutov E. A., Shutko A. M., Experimental studies of the microwave radiation of saline soils, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1990, No. 4, pp. 78–84 (in Russian).
7. Romanov A. N., *Dielektricheskie i radioizluchatel'nye svoystva zasolennykh pochv* (Dielectric and radio-emitting properties of saline soils), Barnaul: Izd. Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta, 2002, 118 p. (in Russian).
8. Romanov A. N., Remote microwave solonchak water content indicator, *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 4, pp. 302–314 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-302-314.
9. Al-Yaari A., Wigneron J.-P., Kerr Y. et al., Evaluating soil moisture retrievals from ESA's SMOS and NASA's SMAP brightness temperature datasets, *Remote Sensing of Environment*, 2017, V. 193, pp. 257–273, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.010>.

10. Armand N. A., Reutov E. A., Shutko A. M., Microwave radiometry of saline soils, *Remote Sensing Applications*, 1989, pp. 19–28.
11. Boyarskii D. A., Tikhonov V. V., Komarova N. Yu., Model of dielectric constant of bound water in soil for applications of microwave remote sensing, *Progress in Electromagnetics Research*, 2002, V. 35, pp. 251–269.
12. Brakhasi F., Walker J. P., Judge J. et al., Soil moisture profile estimation under bare and vegetated soils using combined L-band and P-band radiometer observations: An incoherent modeling approach, *Remote Sensing of Environment*, 2024, V. 307, Article 114148, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114148>.
13. Chi T., Li B., Mu L., Cao G., Application study of the microwave emissivity spectra in the estimation of salt content of saline soil, *Procedia Computer Science*, 2017, V. 107, pp. 727–732, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.03.155>.
14. Dong L., Wang W., Che T. et al., Simultaneous retrieval of soil moisture and salinity in arid and semiarid regions using Sentinel-1 data and a revised dielectric model for salty soil, *Agricultural Water Management*, 2025, V. 312, Article 109410, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109410>.
15. Dong Y., Tucker S., Singh G. et al., Optimizing soil moisture sensor placement through spatial variability analysis in Orchards, *Smart Agricultural Technology*, 2025, V. 12, Article 101273, <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101273>.
16. *Global status of saltaffected soils — Main report*, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024, 240 p., <https://doi.org/10.4060/cd3044en>.
17. Gruber A., De Lannoy G., Albergel C. et al., Validation practices for satellite soil moisture retrievals: What are (the) errors?, *Remote Sensing of Environment*, 2020, V. 244, Article 111806, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111806>.
18. Harani P., Gautam S., Joshi S. K. et al., Advancements in soil moisture estimation through integration of remote sensing and artificial intelligence techniques, *Science of the Total Environment*, 2025, V. 1001, Article 180503, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180503>.
19. Hoang T. P., Ha M. C., Vu P. L. et al., Integrating SMAP and CYGNSS data for daily soil moisture and agricultural drought monitoring in Nghe An province, Vietnam, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2025, V. 39, Article 101664, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101664>.
20. Jackson T. J., O'Neill P. E., Salinity effects on the microwave emission of soils, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 1987, V. GE-25, No. 2, pp. 214–220, DOI: 10.1109/TGRS.1987.289820.
21. Johnson C. K., Eigenberg R. A., Doran J. W. et al., Status of soil electrical conductivity studies by central state researchers, *Trans. American Soc. of Agricultural Engineers*, 2005, V. 48, No. 3, pp. 979–989, DOI: 10.13031/2013.18510.
22. Kerr Y. H., Waldteufel P., Richaumeet P. et al., The SMOS soil moisture retrieval algorithm, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2012, V. 50, No. 5, pp. 1384–1403, DOI: 10.1109/TGRS.2012.2184548.
23. Kim H., Crow W., Li X. et al., True global error maps for SMAP, SMOS, and ASCAT soil moisture data based on machine learning and triple collocation analysis, *Remote Sensing of Environment*, 2023, V. 298, Article 113776, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113776>.
24. Kleshchenko V. N., Komarov S. A., Mironov V. L., Romanov A. N., Dielectric properties of salted grounds in microwave band, *Proc. 1998 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'98)*, V. 2, IEEE, 1998, pp. 992–994, DOI: 10.1109/IGARSS.1998.699650.
25. Komarov S. A., Mironov V. L., Romanov A. N., Frequency dispersion in microwave for complex permittivity of bound water stored in soils and wet salts, *Proc. 1999 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'99)*, V. 5, IEEE, 1999, pp. 2643–2645.
26. Li X., Wigneron J.-P., Frappart F. et al., The first global soil moisture and vegetation optical depth product retrieved from fused SMOS and SMAP L-band observations, *Remote Sensing of Environment*, 2022, V. 282, Article 113272, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113272>.
27. Ma H., Zeng J., Chen N. et al., Satellite surface soil moisture from SMAP, SMOS, AMSR2 and ESA CCI: A comprehensive assessment using global ground-based observations, *Remote Sensing of Environment*, 2019, V. 231, Article 111215, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111215>.
28. McColl K. A., Ryu D., Matic V. et al., Soil salinity impacts on L-band remote sensing of soil moisture, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, V. 9, No. 2, pp. 262–266, DOI: 10.1109/LGRS.2011.2165932.
29. Moore J. C., Fujita S., Dielectric properties of ice containing acid and salt impurity at microwave and low frequencies, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 1993, V. 98, pp. 9769–9780, <https://doi.org/10.1029/93JB00710>.
30. Periasamy S., Ravi K. P., A novel approach to quantify soil salinity by simulating the dielectric loss of SAR in three-dimensional density space, *Remote Sensing of Environment*, 2020, V. 251, Article 112059, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112059>.
31. Reynolds S. G., The gravimetric method of soil moisture determination. Part I. A study of equipment, and methodological problems, *J. Hydrology*, 1970, V. 11, No. 3, pp. 258–273, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90066-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90066-1).

32. Romanov A. N., 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, DOI: 10.1109/TGRS.2019.2927243.
33. Schmugge T. J., Gloersen P. W., Wilheit T., Geiger F., Remote sensing of soil moisture with microwave radiometers, *J. Geophysical Research: Solid Earth and Planets*, 1974, V. 79, No. 2, pp. 317–323, DOI: 10.1029/JB079i002p00317.
34. Shen X., Fan L., Zuo T. et al., P-band radiometry for enhanced vegetation optical depth (VOD) and soil moisture retrieval in dense crop canopies, *Remote Sensing of Environment*, 2024, V. 313, Article 114353, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114353>.
35. Wan H., Qi H., Shang S., Estimating soil water and salt contents from field measurements with time domain reflectometry using machine learning algorithms, *Agricultural Water Management*, 2023, V. 285, Article 108364, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108364>.
36. Wang W., Ma C., Wang X. et al., A soil moisture experiment for validating high-resolution satellite products and monitoring irrigation at agricultural field scale, *Agricultural Water Management*, 2024, V. 304, Article 109071, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109071>.
37. Wilson T. B., Kochendorfer J., Diamond H. J. et al., Evaluation of soil water content and bulk electrical conductivity across the U. S. Climate Reference Network using two electromagnetic sensors, *Vadose Zone J.*, 2024, V. 23, No. 4, Article e20336, <https://doi.org/10.1002/vzj2.20336>.
38. Xing M., Cui K., Dong T. et al., Improved soil moisture retrieval during crop growing season using passive microwave data at L-band, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2025, V. 143, Article 104788, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104788>.