

**Романов Андрей Николаевич**

**ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И  
РАДИОИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛОНЧАКОВ С РАЗНЫМ  
ТИПОМ ПОЧВЕННОГО ЗАСОЛЕНИЯ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ**

## АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Дистанционное микроволновое зондирование земных покровов прошло 60-летний путь развития от первых радиометрических измерений до космических платформ (SMOS, SMAP) [1, 2] и зарекомендовало себя как высокоточный всепогодный метод сбора информации о состоянии подстилающей поверхности.

Важнейшими задачами были и остаются дистанционный мониторинг влажности почвы и солёности Мирового океана, морей, крупных озёр.

В настоящее время погрешность дистанционного определения влажности незасоленной почвы со спутника SMOS, как заявлено в технической документации к SMOS [3], не превышает  $0.04 \text{ см}^3/\text{см}^3$  [3].

Однако эта погрешность значительно увеличивается при дистанционном микроволновом зондировании засоленных почв, а также почв, содержащих в своём составе водорастворимые химические соединения, в том числе, удобрения.

Согласно докладу FAO (Food and Agriculture Organization) 11 декабря 2024 года, суммарная площадь засоленных почв в настоящее время составляет около 1,381 миллиарда гектар [4].

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. Б.Г. Кутуза А.Е. Башаринов – основоположник микроволнового дистанционного зондирования Земли. Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн» - Муром 2021.
3. SMOS L2 OS Algorithm Theoretical Baseline. Document. Doc: SO-TN-ARG-GS-0007. Issue: 4 Rev: 1. Date: 12 February 2021.
4. FAO. 2024. Global status of salt-affected soils – Main report. Rome. <https://doi.org/10.4060/cd3044en>

Среди засоленных почв особой агрессивностью к произрастающим на них растениям обладают солончаки [5-8], характеризующиеся наличием в верхних почвенных горизонтах легкорастворимых солей  $NaCl$ ,  $Na_2CO_3$ ,  $Na_2SO_4$ ,  $CaCl_2$ ,  $MgCl_2$  в количествах, препятствующих развитию большинства растений [9].



В природных условиях наблюдается сильная пространственно-временная динамика физико-химических свойств солончака, зависящая от погодных условий.

**Возможна ли дистанционная оценка влажности солончака по данным микроволнового зондирования с приемлемой точностью**, если диэлектрические и радиоизлучательные характеристики солончаков зависят от совокупного влияния термодинамической температуры (T), объёмной влажности (W), засолённости (Z), типа почвенных солей, наличия слоистой структуры с разными физико-химическими свойствами грунта в каждом слое, а также от погоды?

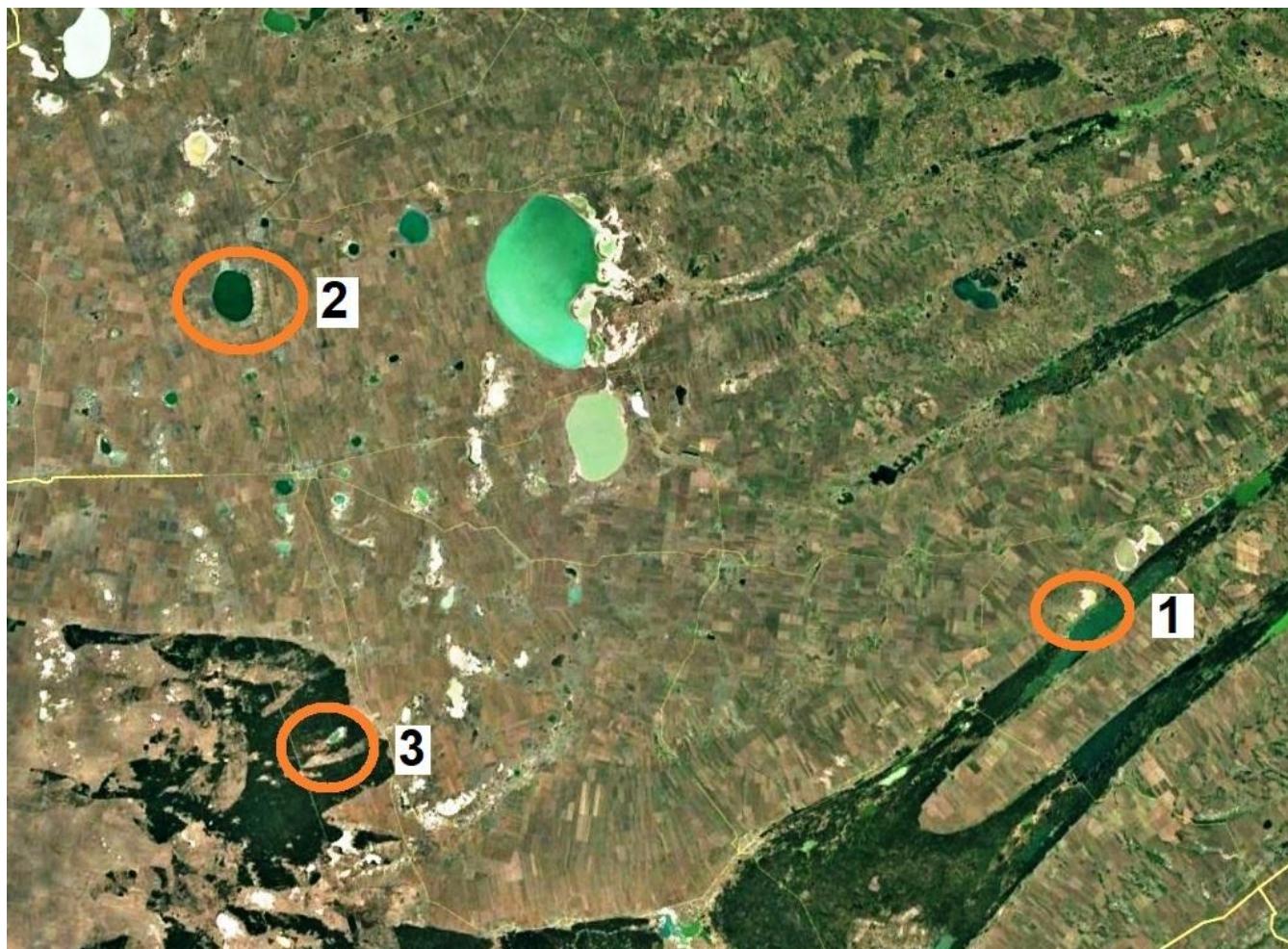
5. Ковда В.А. Солончаки и солонцы. Л.: Изд-во АН СССР, 1937. 246 с.
6. Ковда В.А. Происхождение и режим засоленных почв. Вып. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1946. 574 с.
7. Базилевич Н.И. Геохимия почв содового засоления. М.: Наука, 1965. 349 с.
8. Ковда В.А. Проблемы борьбы с опустыниванием и засолением орошаемых почв. М.: Колос, 1984. 304 с.
9. IUSS Working Group WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria.

[https://www.isric.org/sites/default/files/WRB\\_fourth\\_edition\\_2022-12-18.pdf](https://www.isric.org/sites/default/files/WRB_fourth_edition_2022-12-18.pdf)

## Объекты исследования

В качестве основных объектов исследования были выбраны солончаки, прилегающие к гиперсолёным озерам Кулундинской равнины (Алтайский край), расположенные поблизости от населённых пунктов.

Иссушённая поверхность солончаков с отложенными на поверхности мелкодисперсными токсичными солями, раздуваемыми ветром, представляет реальную угрозу здоровью проживающего поблизости населения.



Белые пятна на карте – участки солончаков и засоленных почв.

1 -Мормышанский хлоридно-сульфатный солончак

2 - хлоридно-сульфатный солончак в окрестностях гипергалинного озера Большое Яровое

3 - Петуховский содовый солончак

## Методика исследований

В ходе исследований проводили отбор проб солончакового грунта с разной глубины (0-5 см (0-1 см, 1-5 см), 5-10 см). В лабораторных условиях определяли влажность, плотность почвы, ионный состав растворённых солей, диэлектрические характеристики на частоте 1.41 ГГц для установления зависимостей коэффициентов излучения от температуры и объемной влажности. На 1.41 ГГц работает радиометр MIRAS (Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis), установленный на спутнике SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity).

Для измерения суточных, сезонных и годовых вариаций температуры и влажности в метровом слое почвы использовали разработанную нами радиотехническую установку.

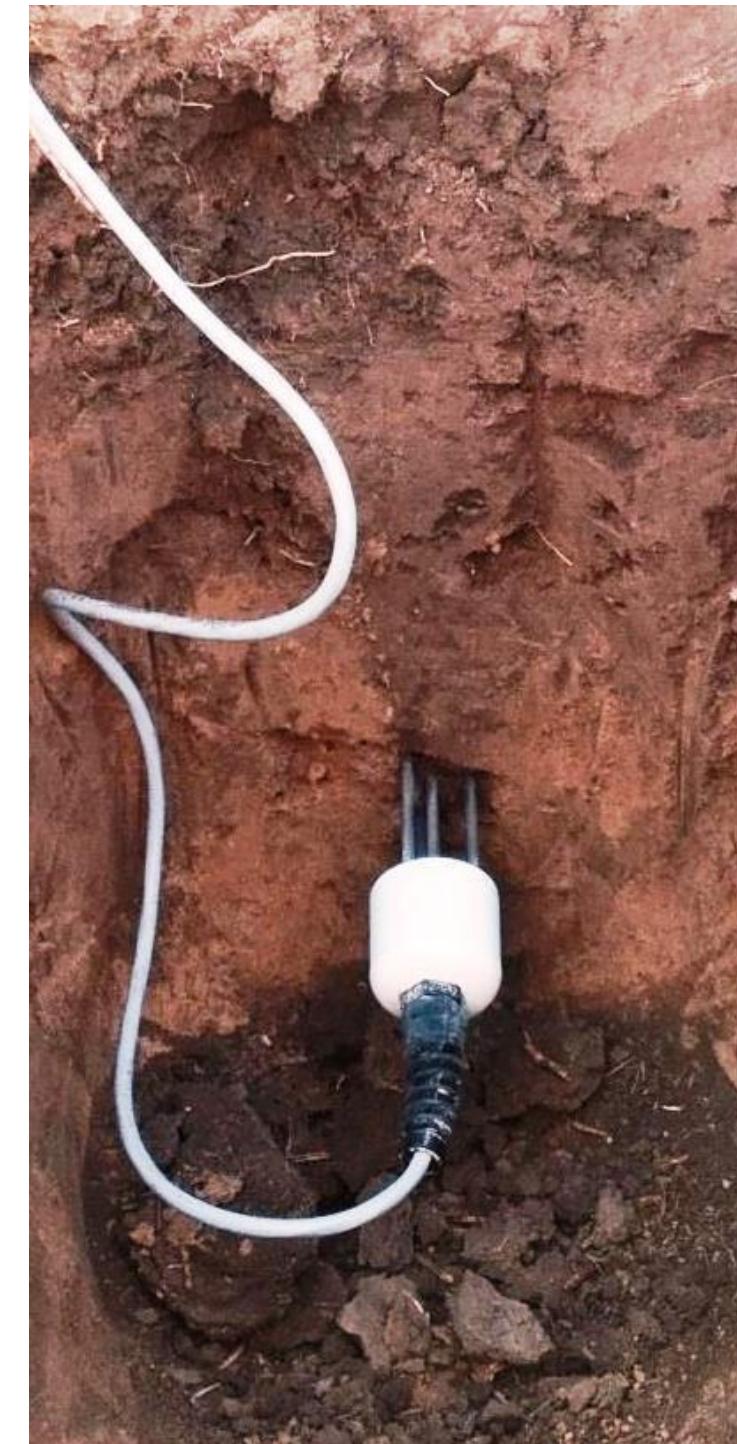


В полевых условиях с помощью портативного датчика *Stevens HydraGO* (Stevens Water Monitoring Systems) измеряли объемную влажность ( $\pm 0,01\%$ ), температуру почвы ( $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ ), объемную электропроводность ( $\pm 0,02 \text{ См/м}$ ), действительную и мнимую части комплексной диэлектрической проницаемости.

Для количественного описания содержащейся в образце воды использовали объёмную влажность, определяемую из соотношения  $W = (\rho/\rho_{\text{в}})W_{\text{м}}$ , где  $W_{\text{м}} = M_{\text{в}}/M$  – массовая влажность,  $M_{\text{в}} = M - M_{\text{сух}}$  – масса содержащейся в образце воды,  $M, M_{\text{сух}}$  – массы влажного и высушенного образцов,  $\rho, \rho_{\text{в}} \approx 1 \text{ г}/\text{см}^3$  – плотности почвенного образца и воды, соответственно.

**Засолённость почвы** определяли по формуле  $Z = M_{\text{с}}/M$ .

**Массовую концентрацию соли** в растворе определяли по формуле  $S = M_{\text{с}}/M_{\text{р}}$ ,  $M_{\text{р}} = M_{\text{с}} + M_{\text{в}}$  – масса раствора,  $M_{\text{с}}, M_{\text{в}}$  – массы безводной соли, воды.



**Хлоридно-сульфатно-натриевый солончак с  
присутствием гидрокарбонатов, прилегающий  
к супергалинному озеру Мормышанскому**

В непосредственной близости располагается  
популярный туристский центр с высокой  
посещаемостью туристов из регионов Сибири.



# Солончак, прилегающий к супергалинному озеру Мормышанскому





## Многослойное строение Мормышанского хлоридно-сульфатно-натриевого солончака по глубине



Слой 0-1 см	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> мг/кг	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> мг/кг	Cl <sup>-</sup> мг/кг	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> мг/кг	Ca <sup>2+</sup> мг/кг	Mg <sup>2+</sup> мг/кг	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> мг/кг	Сумма солей, мг/кг
Мормышанский солончак	12840,0	32787,5	36554,0	5464,8	80,0	1224,0	46408,3	135358,6



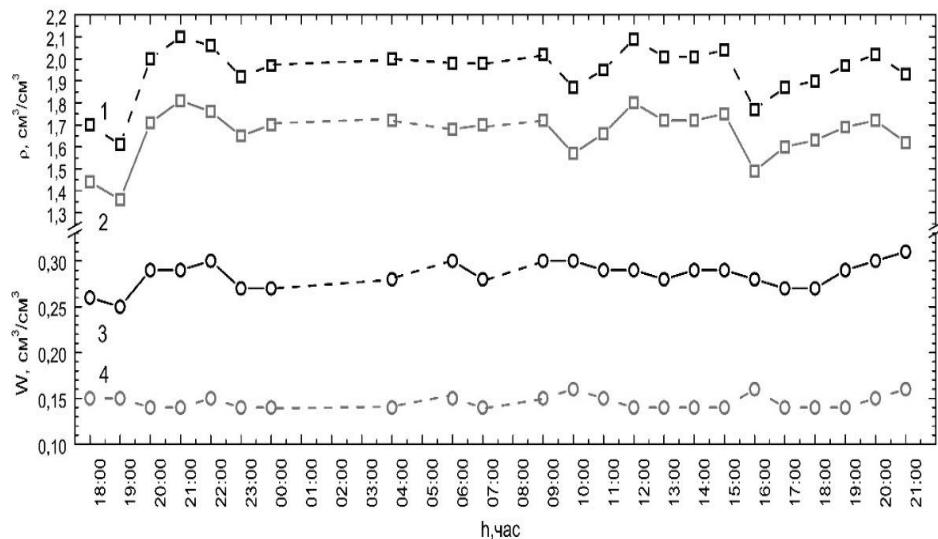
## Многослойное строение Мормышанского солончака



Глубина отбора	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> мг/кг	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> мг/кг	Cl <sup>-</sup> мг/кг	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> мг/кг	Ca <sup>2+</sup> мг/кг	Mg <sup>2+</sup> мг/кг	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> мг/кг	Сумма солей, мг/кг
0-1 см	600,0	3324,5	23856,0	5596,5	120,0	1152,0	17726,0	52375,0
1-5 см	60,0	1067,5	9471,0	2272,6	50,0	318,0	7094,2	20333,3
5-10 см	90,0	1006,5	17381,0	3516,0	80,0	420,0	12658,0	35151,5

# Хлоридно-сульфатно-натриевый солончак Мормышанский

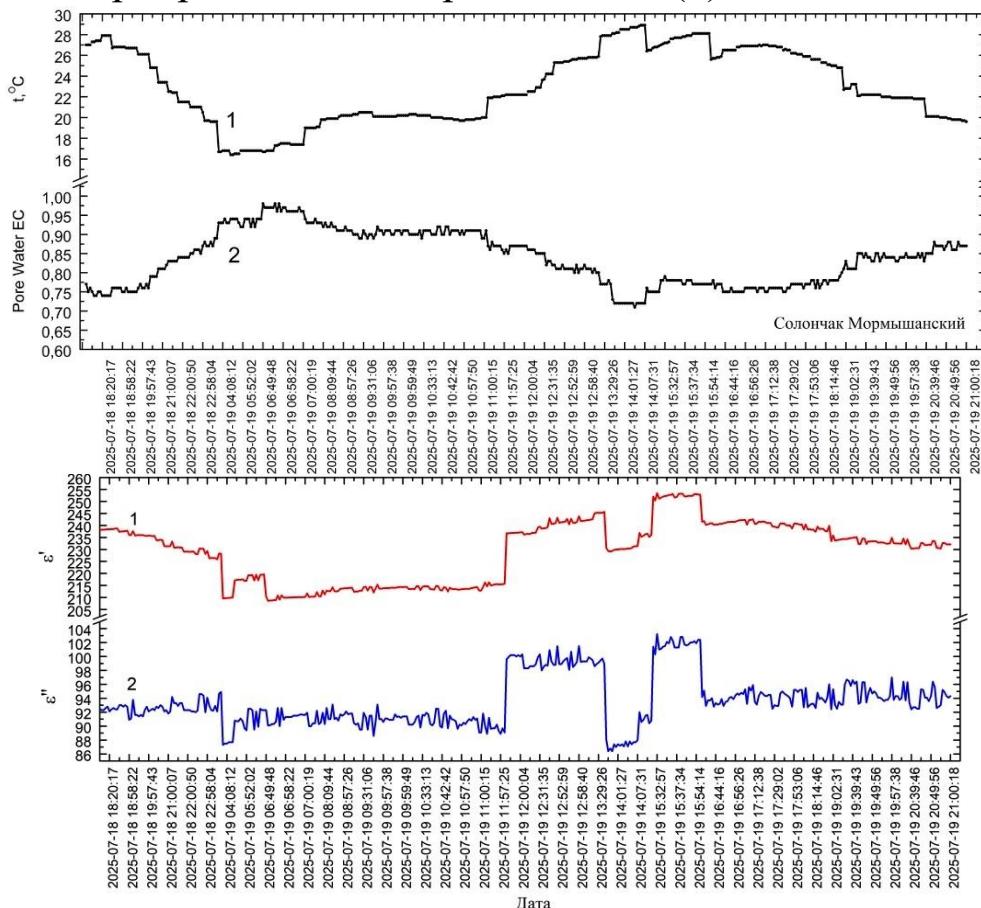
На рисунке приведены суточные изменения физических характеристик поверхности солончака в одном и том же месте в слое 0-5 см (гравиметрический способ). Видно, что массовая влажность  $W_M$  [г/г] в пределах погрешности изменяется незначительно. В то же время объёмная влажность  $W_V$  [см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>] претерпевает более заметные изменения, что может быть связано с различием плотностей влажного и сухого грунта. При одном и том же значении  $W_M$  величины  $\rho_V$  и  $W_V$  могут изменяться за счёт разного количества солей, растворённых в грунтовой воде.



Суточная динамика плотности и влажности в слое 0-5 см: 1, 2 – плотности влажного и сухого грунта; 3, 4 – объёмная и массовая влажности.

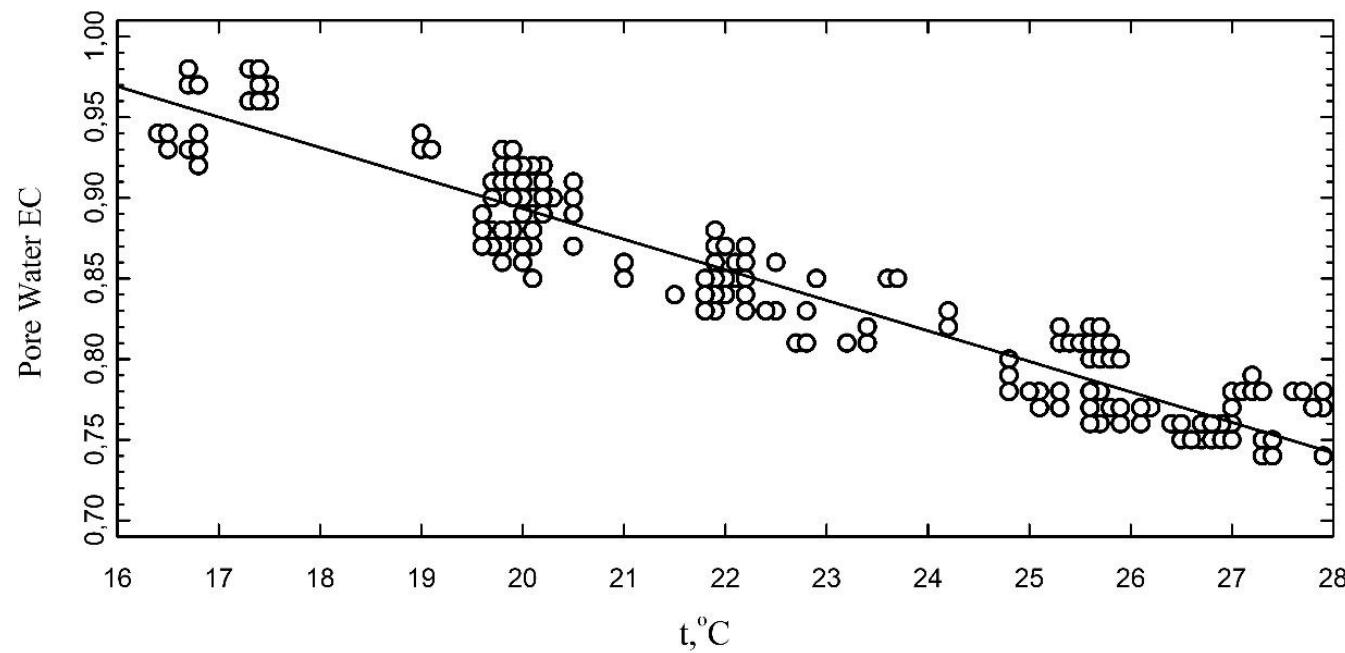
Видно, что физические и диэлектрические характеристики солончакового грунта с хлоридно-сульфатным типом засоления претерпевают значительные изменения в течение суток.

Суточная динамика температуры (1) и электропроводности поровой влаги (2) в слое 0-5 см.

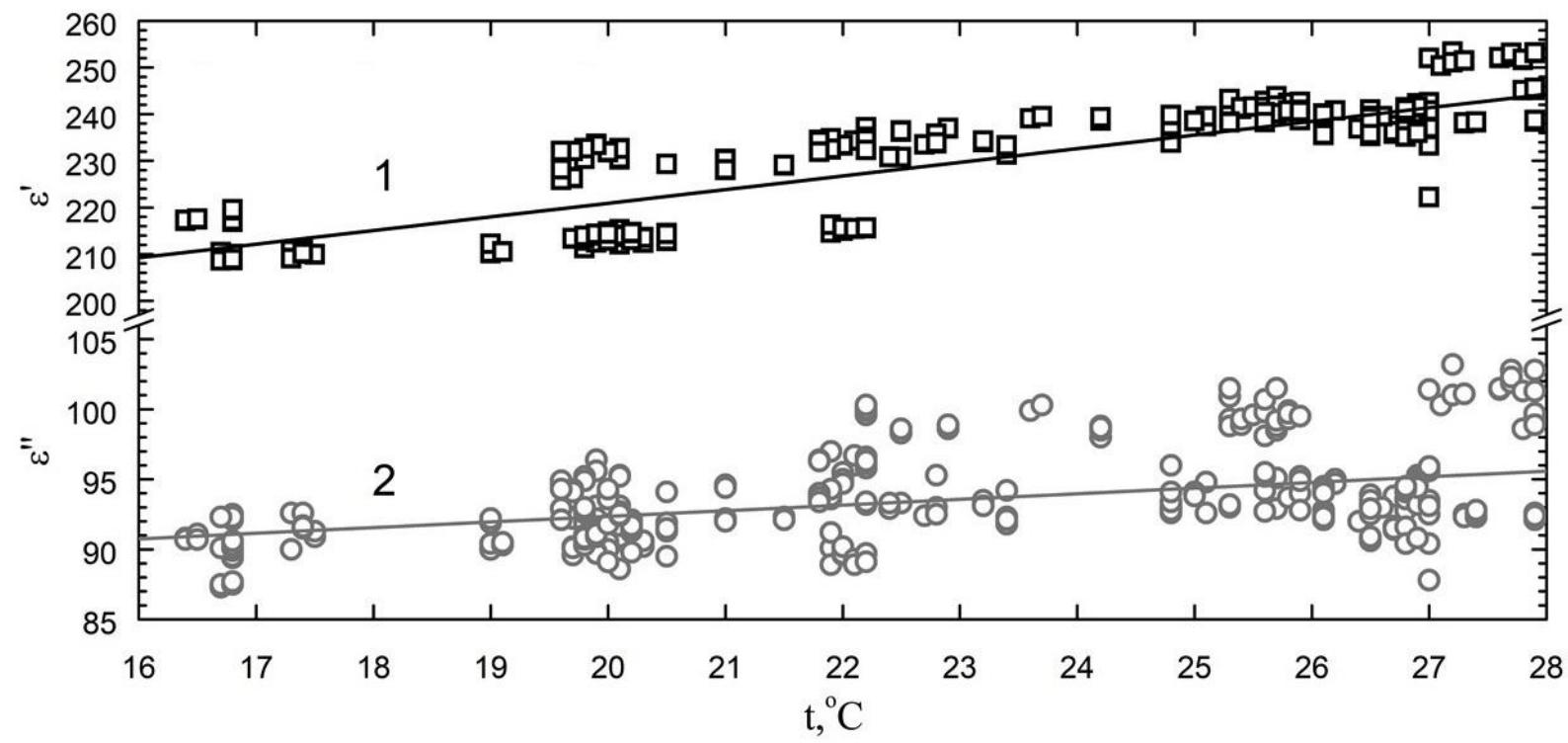


Зависимости действительной (1) и мнимой (2) частей КДП от температуры

Зависимости  
электропроводности поровой  
влаги от температуры



Зависимости  
действительной (1) и  
мнимой (2) частей  
КДП от температуры



# Хлоридно-сульфатный солончак, прилегающий к соленому озеру Большое Яровое

На берегу озера располагается город-курорт Яровое.  
Полевая дорога к берегу озера через солончак



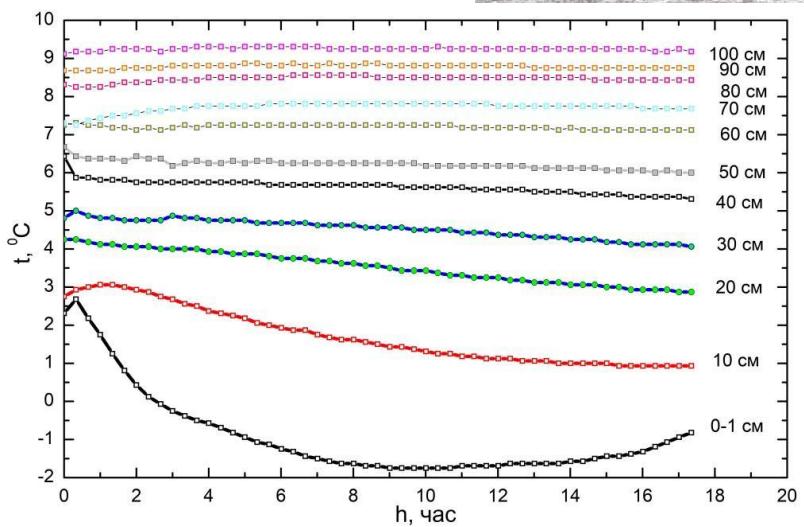
# Солончак, прилегающий к горько-соленому озеру Большое Яровое

Кукурузное поле





## Содовый солончак, прилегающий к содовому озеру Петухово, расположенному в сосновом бору



Суточная динамика температуры  
содового солончака в слое 0-100 см.

# Фото поверхности содового солончака в разное время суток



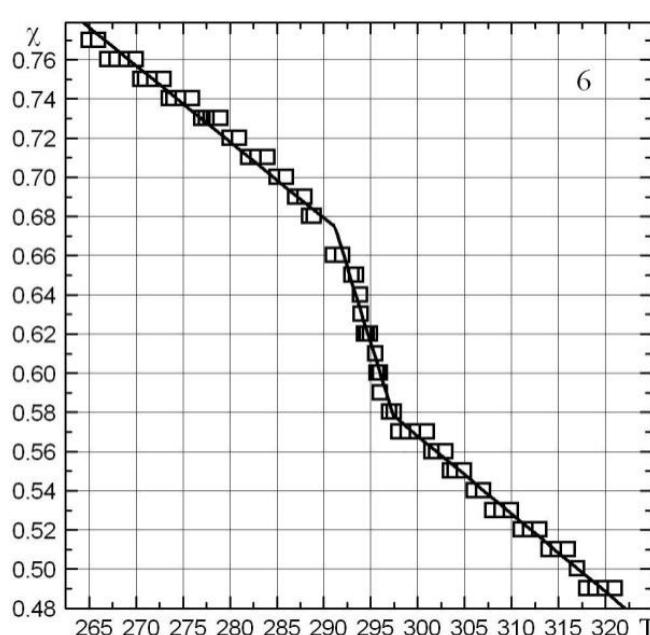
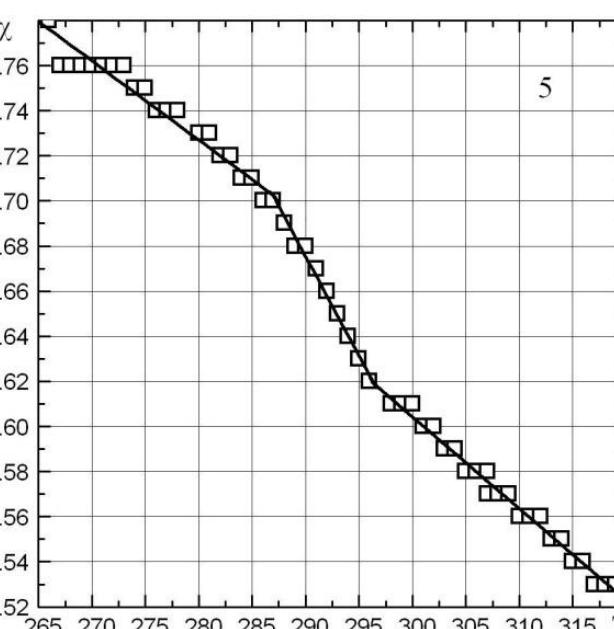
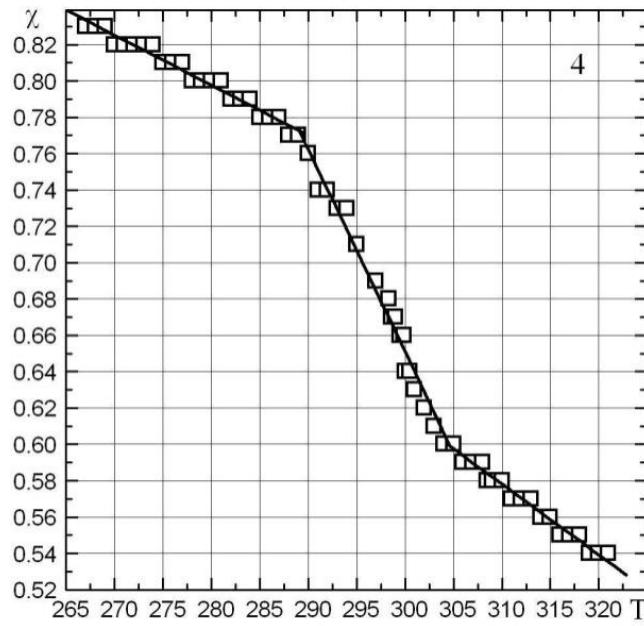
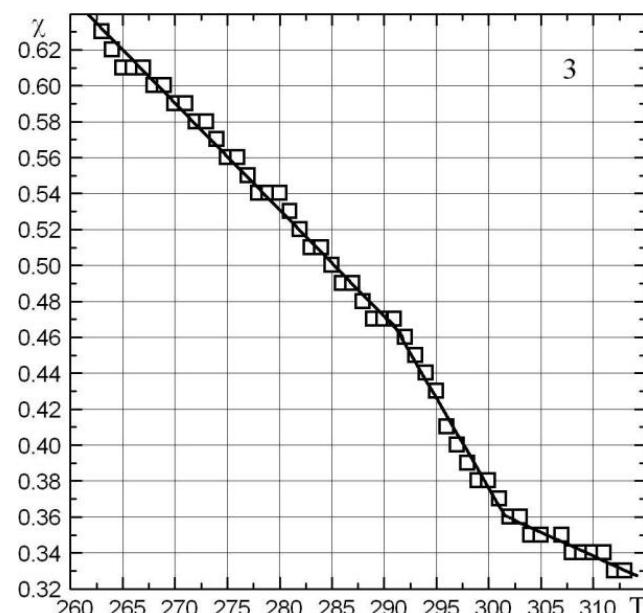
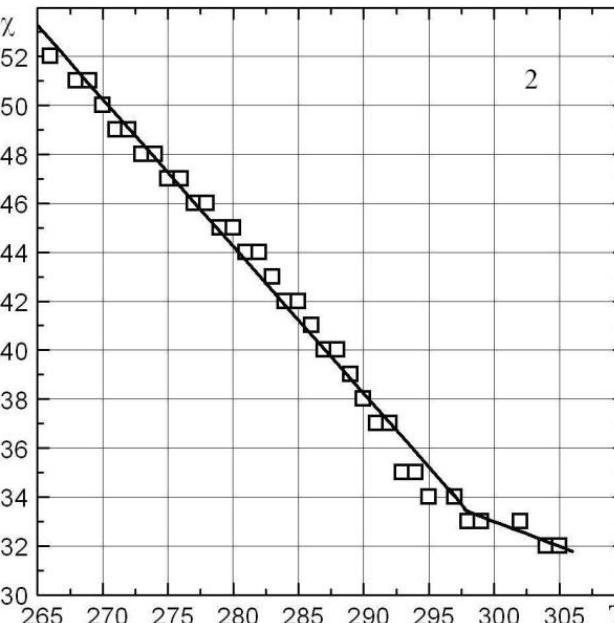
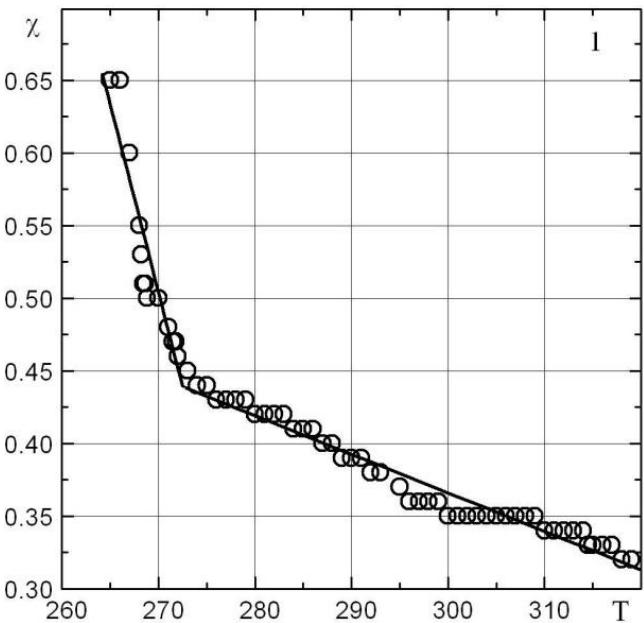
# Результаты водной вытяжки, мг/кг

Время суток	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
5:00	17,436	41,834	6,233	0,887	0,004	0,056	33,555	0,017	0,000
9:00	17,217	38,678	9,259	0,293	0,037	0,011	34,505	0,007	0,000
11:00	17,560	40,403	7,610	0,220	0,062	0,009	34,137	0,009	0,000
14:00	17,096	41,110	7,400	0,275	0,034	0,004	34,082	0,009	0,000
18:50	21,620	44,048	6,202	0,342	0,046	0,007	33,938	0,017	0,000
22:00	16,892	40,127	8,465	0,261	0,027	0,010	34,217	0,005	0,000
04:00	16,781	40,921	7,658	0,906	0,002	0,029	33,705	0,008	0,000
10:00	18,111	40,255	6,700	1,010	0,002	0,030	33,893	0,007	0,000
11:00	16,630	41,824	7,052	0,928	0,003	0,035	33,531	0,008	0,000
12:00	15,679	41,092	8,131	1,540	0,003	0,041	33,517	0,012	0,000
13:00	17,001	43,755	4,907	1,103	0,005	0,055	33,179	0,009	0,000

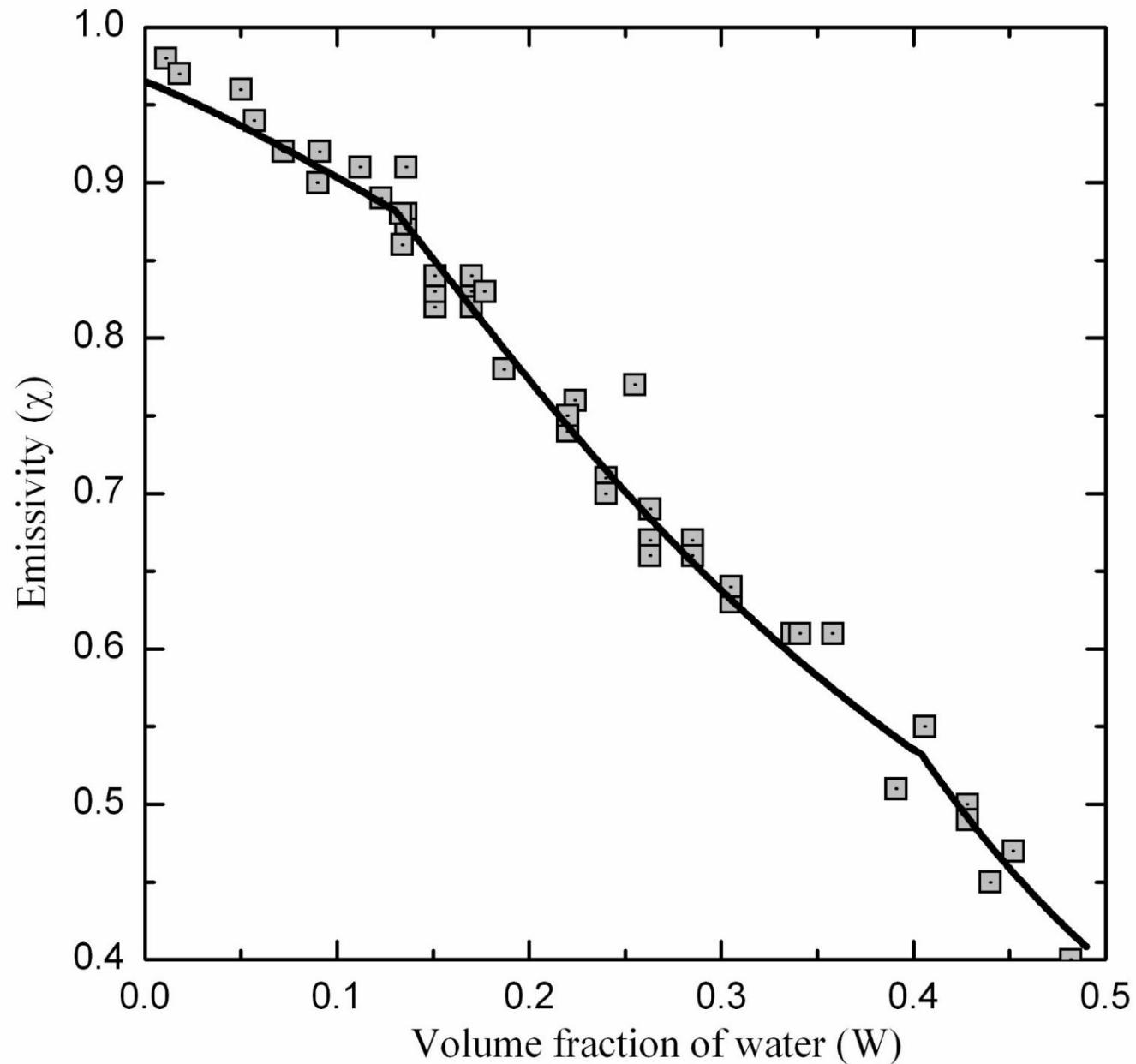
## Изменение катионного состава солончака в течение суток (max/min)

CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Сумма солей мг/кг
2,61	2,42	3,93	8,48	16,00	12,00	2,56	3,75	8,00	2,52

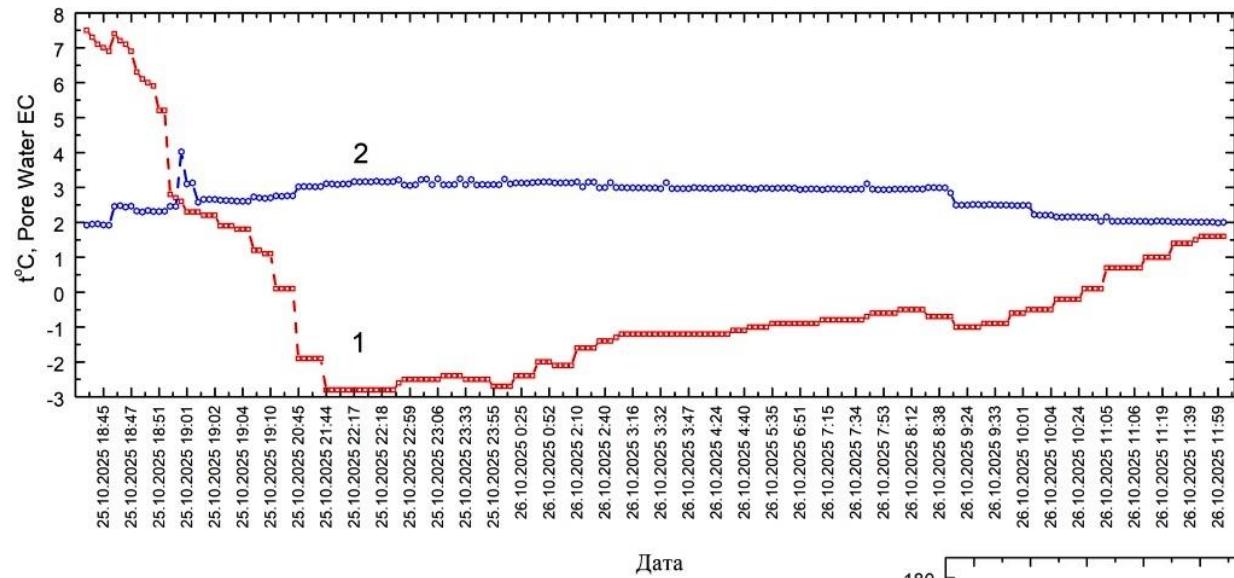
# Зависимости коэффициента излучения ( $\chi$ ) солончакового грунта (содовый тип засоления) от температуры (T) на частоте 1.41 ГГц



Зависимость коэффициента излучения ( $\chi$ ) солончакового грунта от объёмной влажности (W) (содовый солончак) на частоте 1.41 ГГц

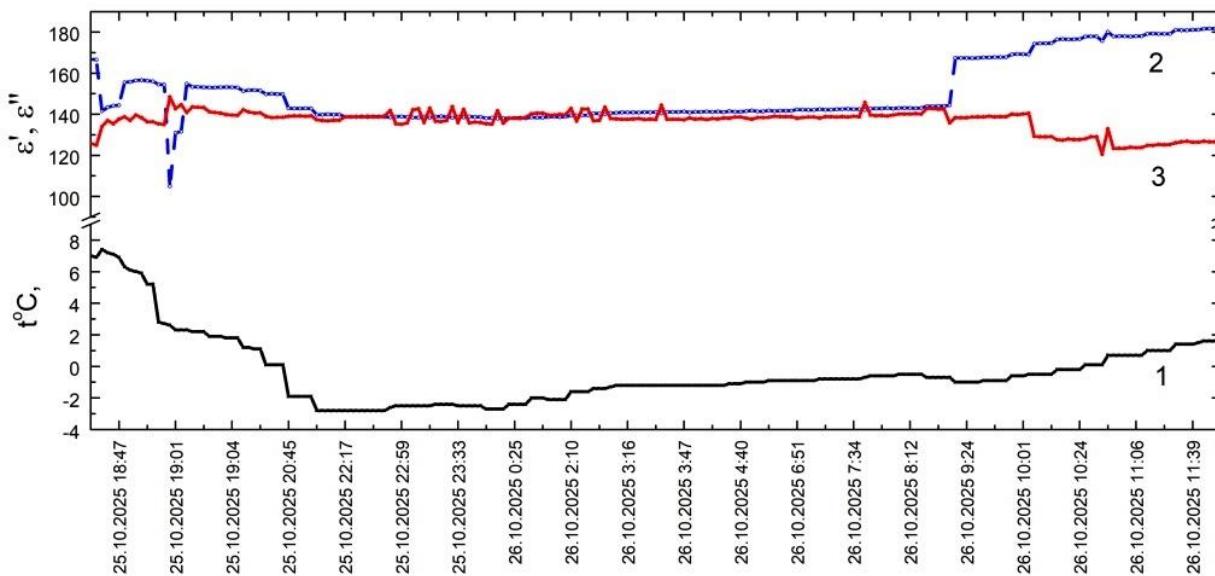


# СОДОВЫЙ СОЛОНЧАК «ПЕТУХОВСКИЙ»



Суточная динамика температуры  
(1) и электропроводности  
поровой влаги (2) в слое 0-5 см.

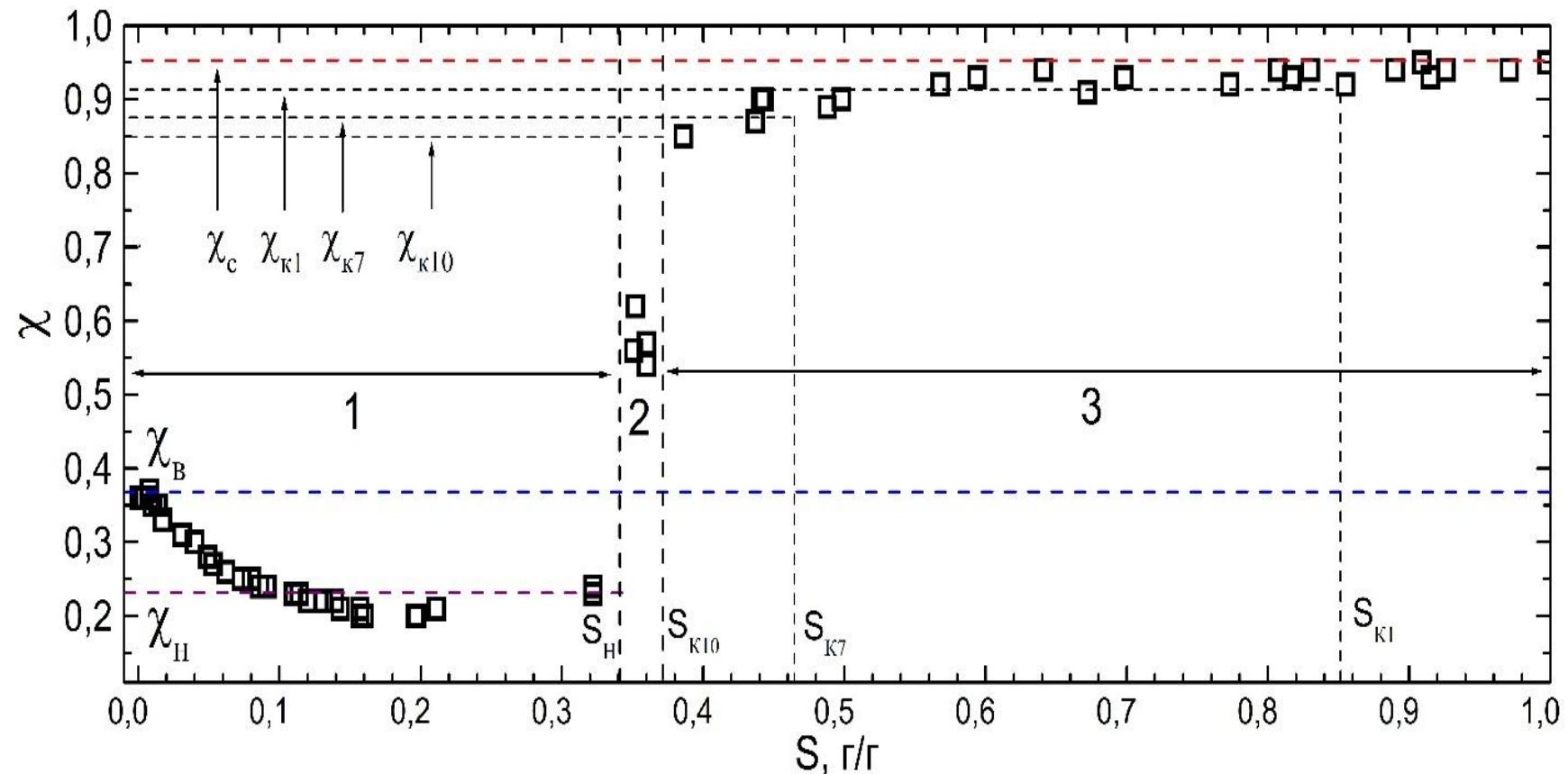
Суточная динамика термодинамической  
температуры (1), действительной (2) и  
мнимой (3) частей КДП содового  
солончака в слое 0-5 см.



Физические и диэлектрические характеристики солончакового грунта с содовым типом засоления претерпевают значительные изменения в течение суток.

Соответственно, возникает необходимость поиска новых подходов и разработки новых методов для дистанционного мониторинга солончаков.

В качестве одного из подходов, для анализа состояния содового солончака может быть использована экспериментальная зависимость коэффициента излучения ( $\chi$ ) от массовой концентрации соли ( $S$ ) в водном растворе  $Na_2CO_3$  на частоте 1.41 ГГц.

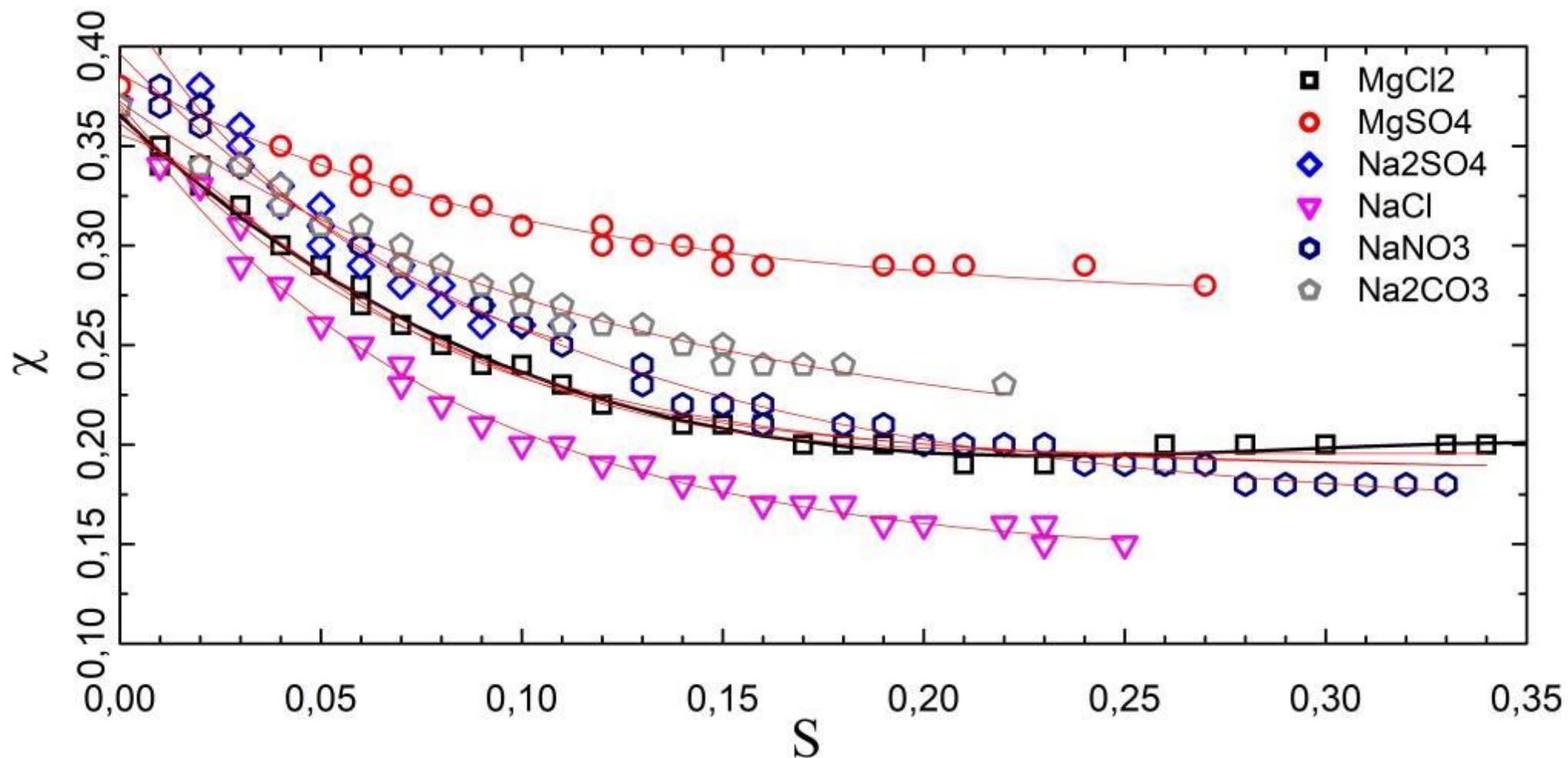


$S_H, S_{k10}, S_{k7}, S_{k1}$  соответствуют насыщенному раствору и 10-, 7-, 1-водным кристаллогидратам; 1, 2, 3 – диапазоны  $S$ , соответствуют разным состояниям образца.

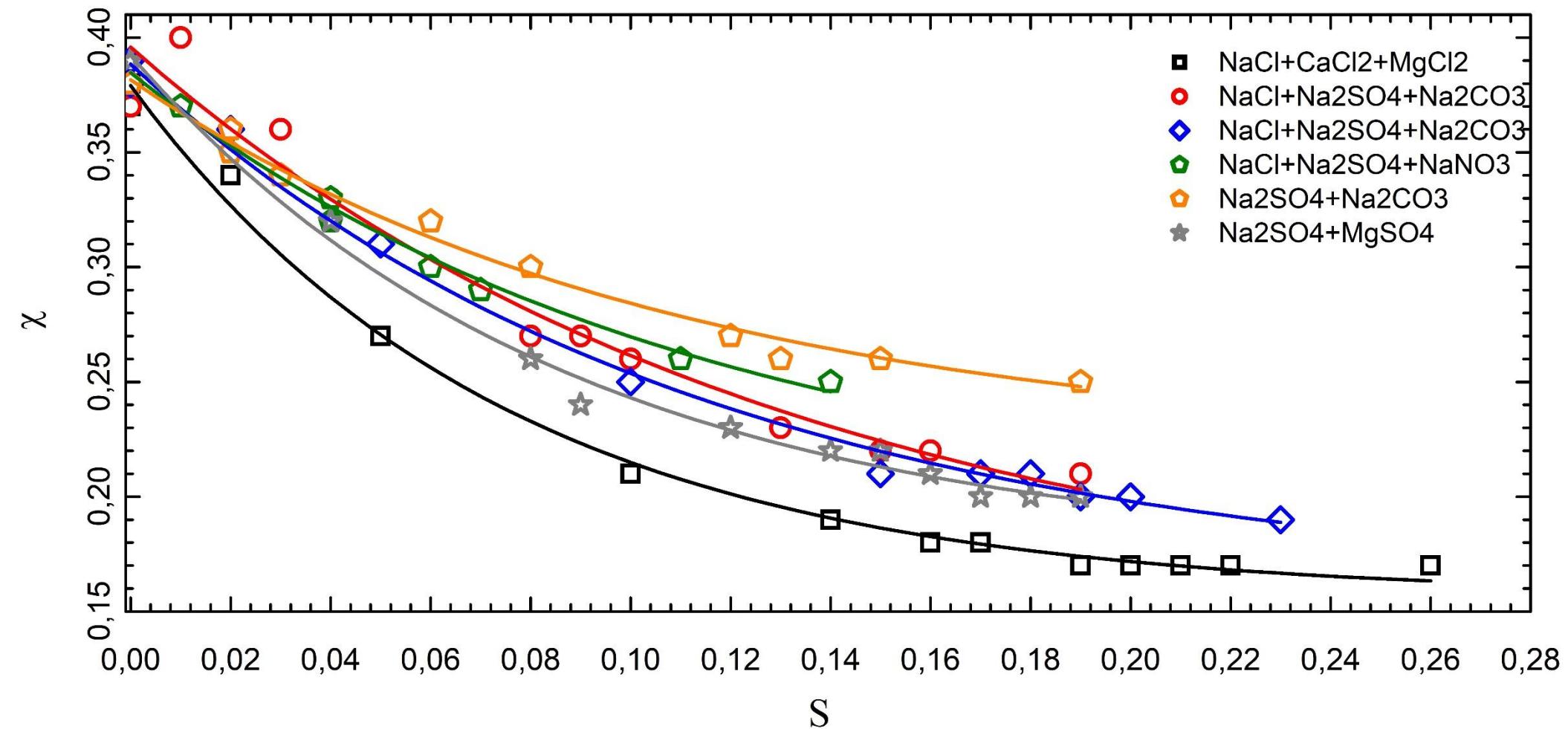
Следует отметить, что в засолённой почве присутствует, как правило, не одна соль, а комплекс разных солей. Соответственно, возникает необходимость установления подобных зависимостей  $\chi(S)$  для других типов солей, образующих кристаллогидраты, а также, возможно, для конкретных засолённых почв.

Следует отметить, что в засолённой почве присутствует, как правило, не одна соль, а комплекс разных солей. Соответственно, возникает необходимость установления подобных зависимостей  $\chi(S)$  для других типов солей, а также для конкретных засолённых почв.

### Зависимости коэффициента излучения ( $\chi$ ) водно-солевого раствора от массовой концентрации соли (S) на частоте 1.41 ГГц



**Зависимости коэффициента излучения ( $\chi$ ) водно-солевого раствора от  
массовой концентрации соли (S) на частоте 1.41 ГГц**



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/>.

**БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ**