Двадцать четвертая международная конференция
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"

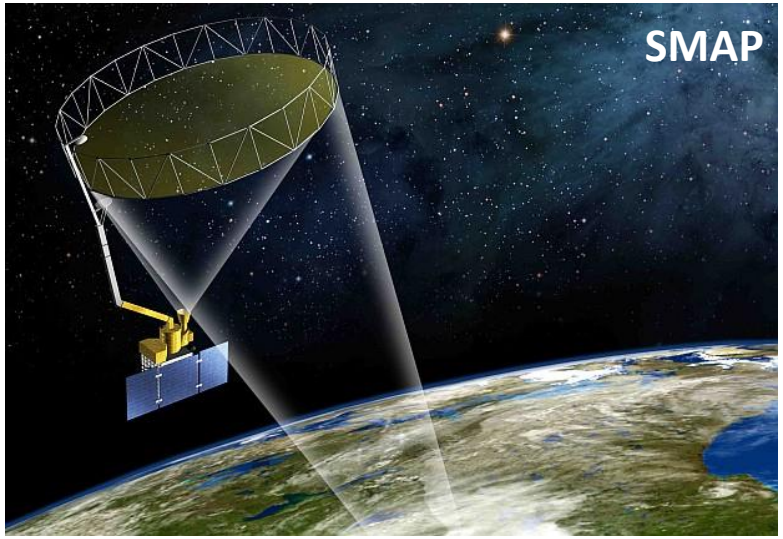


СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И РАДИОИЗЛУЧАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛОНЧАКОВ С РАЗНЫМ ТИПОМ ЗАСОЛЕНИЯ

А.Н. Романов, И.В. Рябинин, Д.А. Романов
Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия,
656038. Алтайский край, Барнаул, ул. Молодёжная, д. 1, Russia,
phone +7(385-2)66-64-62, romanov_alt@mail.ru

АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ





В последние 10-15 лет одним из быстро развивающихся методов сбора информации о Земной поверхности является спутниковая микроволновая радиометрия (СМР) земных покровов, прошедшая путь от первых радиометрических измерений [1, 2] до современных космических платформ SMOS (Soil Moisture Ocean Saliniry) [3], SMAP (Soil Moisture Active Radiometer), зарекомендовав себя как высокоточный метод сбора информации о состоянии подстилающей поверхности.

Важными задачами были и остаются дистанционный мониторинг влажности почвы и солёности воды в океане, морях, крупных озёрах [4, 5].

На современном этапе развития радиометрической аппаратуры космического базирования заявленная разработчиками погрешность дистанционного определения влажности почвы со спутника SMOS не превышает **0,04 см^3/см^3** [6].

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. Schmugge T.J., Goersen P.W. Wilheit T. et al. Remote Sensing of Soil Moisture with Microwave Radiometry //J. Geophys. Res. 1974. V. 79. No. 2. P. 317-323. doi:10.1029/JB079i002p00317

3. Kerr Y.H., Waldteufel P., Richaume H.P. et al. "The SMOS Soil Moisture Retrieval Algorithm // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2012. V. 50. No 5. P. 1384-1403. **doi:** 10.1109/TGRS.2012.2184548.

4. 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 .

5. Xing M., Cui K., Dong T. et al. Improved soil moisture retrieval during crop growing season using passive microwave data at L-band // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 2025. V. 143. Article 104788. https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104788 .

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.

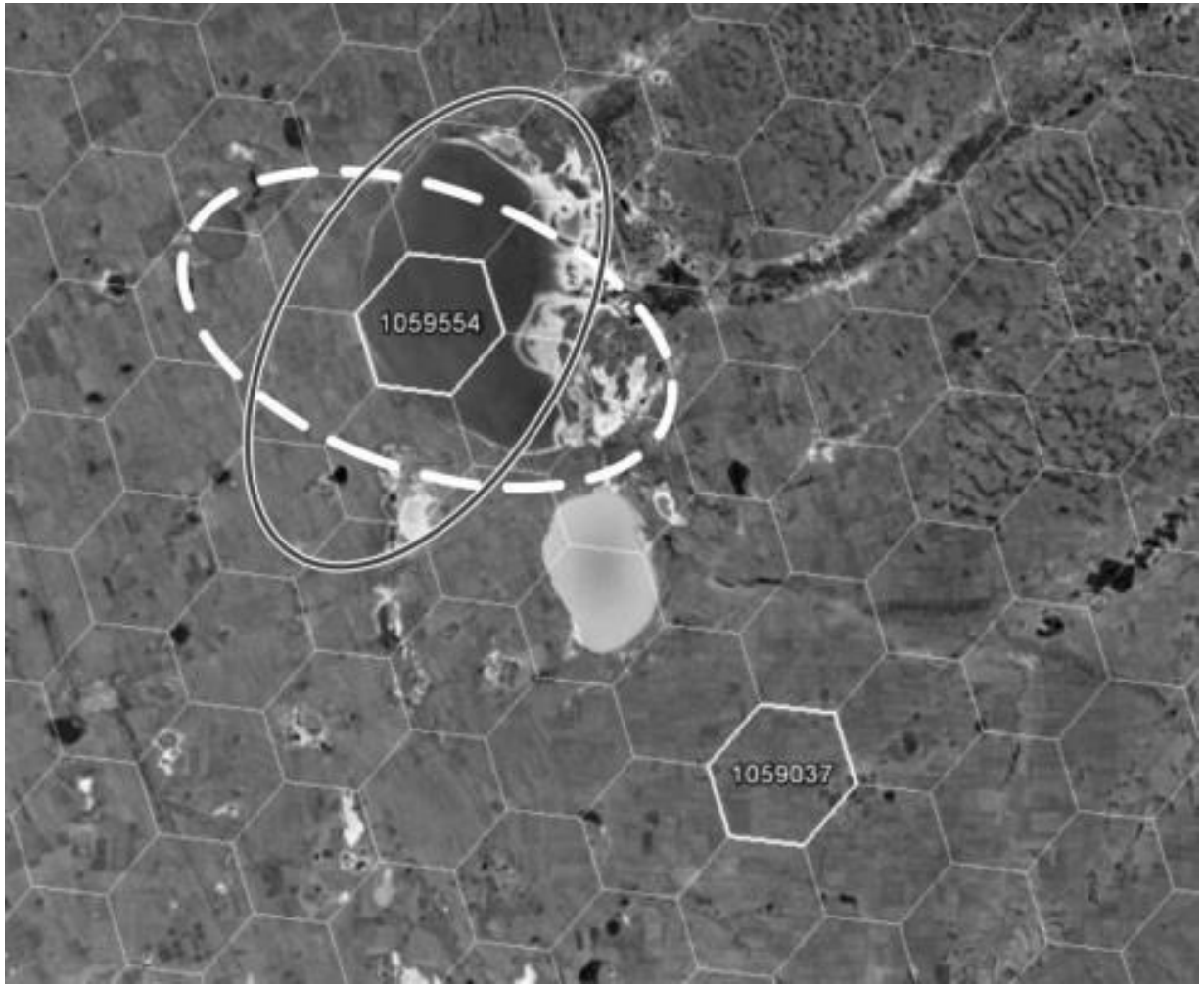
6. Al-Yaari A., Wigneron J.-P., Kerr Y., et al. Evaluating soil moisture retrievals from ESA's SMOS and NASA's SMAP brightness temperature datasets // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 193. P. 257-273. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.03.010 .

АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Однако точность дистанционного определения влажности существенно снижается при попадании участков засолённых почв в диаграммы направленности антенн спутниковых радиометров.

Так, например, при использовании базового алгоритма SMOS Level 2 без учета почвенного засоления весь бюджет погрешности SMOS, будет обусловлен только засолённостью в зонах наблюдения SMOS при общей площади засолённых участков 25% (возможно, даже значительно меньше) [7].

Следовательно, частичное засоление не может считаться несущественным фактором для микроволновых спутниковых миссий по измерению влажности почвы.



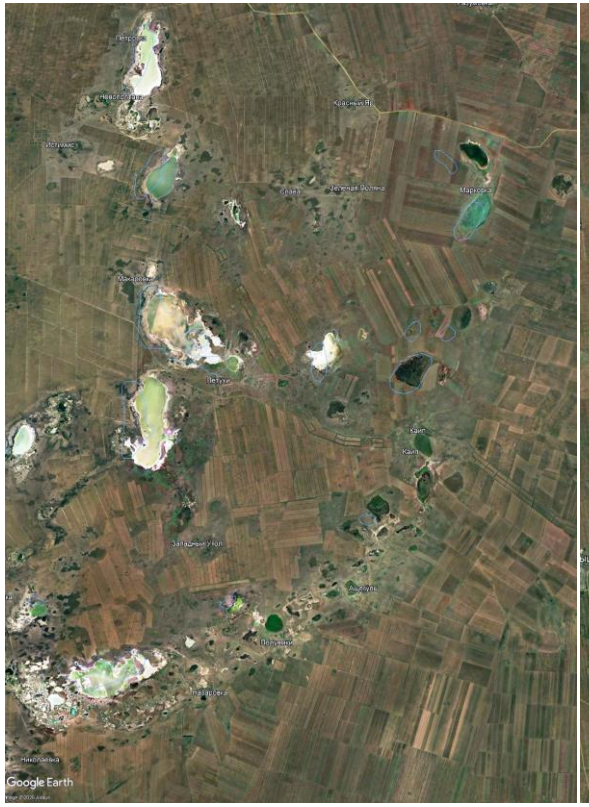
Пиксел спутникового радиометра MIRAS (Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis), установленного на спутнике SMOS.

7. 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. P. 262-266. doi:10.1109/LGRS.2011.2165932

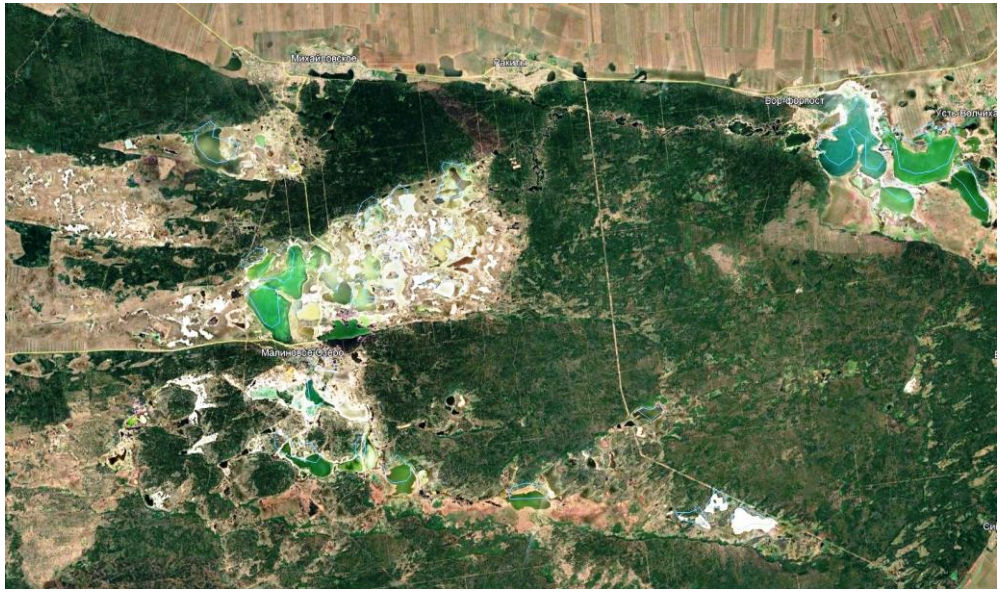
АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Согласно докладу Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН (FAO - (Food and Agriculture Organization) от 11 декабря 2024 года, суммарная площадь засолённых почв на Земном шаре в настоящее время составляет около 1,381 миллиарда гектар [8].

Среди засоленных почв особой агрессивностью к произрастающим на них растениям обладают солончаки, представляющие собой тип почвы, характеризующийся наличием в верхних горизонтах легкорастворимых солей NaCl, $Na2SO_4$, $CaCl_2$, $MgCl_2$, Na_2CO_3 и др. в количествах, препятствующих развитию большинства растений [9].







8. FAO. 2024. World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2024. Rome. https://doi.org/10.4060/cd2971

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

Солончаки приурочены к засушливым и полузасушливым климатическим зонам, прибрежным районам озёр, морей, широко распространены в степных, полупустынных, пустынных регионах мира.







Проблема повышения достоверности данных дистанционного радиоволнового зондирования солончаков (как предельного случая накопления почвенных солей) заключается в значительной суточной и сезонной (особенно в летний период) изменчивости электрофизических, диэлектрических и радиоизлучательных характеристик солончаковых грунтов, зависящих от совокупного влияния температуры, объёмной влажности, засолённости, ионного состава солей, а также от гранулометрического состава, определяющего объёмные доли связанной и свободной воды.

Методика исследований

В данной работе приведен сравнительный анализ результатов моделирования диэлектрических и радиоизлучательных характеристик солончаков, основанный на экспериментальных данных.

В полевых условиях исследовали суточную динамику электрических, диэлектрических характеристик подстилающей поверхности солончака.

В лабораторных условиях измеряли электрофизические и диэлектрические характеристики солончаковых грунтов при разных значениях температуры (-19…+40°С), объёмной влажности (от 0 до 0,28 $см^3/см^3$). На их основе рассчитывали радиоизлучательные характеристики солончаковых грунтов.

Использовали образцы солончаковых грунтов с поверхности природных солончаков с разным составом солей: 1)хлоридно-натриевый солончак, прилегающий к озеру Бурсоль; 2) содовый солончак озера Танатар-2; 3) сульфатно-хлоридный солончак озера Мормышанское; 4) содовый солончак озера Петухово (содовое). Для каждого исследуемого солончака определяли гранулометрический состав грунта и ионный состав почвенного раствора.



Электрофизические и диэлектрические характеристики измеряли на частоте 50 МГц методом коаксиальной импедансной диэлектрической рефлектометрии с помощью датчика Stevens HydraGO, предназначенного для определения температуры, влажности, электропроводности почвы и поровой влаги, действительной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости.

Датчик подключался к сотовому телефону по Bluetooth с помощью приложения HydraGO. Зубцы датчика длиной 6 см обеспечивают измерение объёмной электропроводности почвы (Bulk Electrical Conductivity – EC_{bulk}), электропроводности поровой влаги (Pore Water Electrical Conductivity – EC_{PW}) и температуры (t°C) с погрешностями не более ± 0,02 См/м и ± 0,3°С.

$\boldsymbol{EC_{PW}}$ отражает содержание растворимых солей в почвенном растворе и доступность воды для растений, используется как сельскохозяйственный стандарт.

$\boldsymbol{EC_{bulk}}$ отражает общую засоленность почвы, учитывая влияние растворимых и нерастворимых солей.

Для оценки характеристик микроволнового излучения подстилающей поверхности использовали радиояркостную температур T_B и коэффициент излучения χ, связанные соотношением [10, 11]

$$\boldsymbol{T_B = \chi \cdot T_{eff}},$$

где, T_{eff} – эффективная температура подстилающей поверхности в скин-слое толщиной $L_{eff} = \lambda/(4\pi\sqrt{|\varepsilon|}tg\delta)$, λ – длина волны, $|\varepsilon| = \varepsilon'\sqrt{1+tg^2\delta}$, $tg\delta = \varepsilon''/\varepsilon'$ – тангенс угла потерь, ε′, ε″ – действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости почвы; $\sqrt{\varepsilon} = n + i\kappa$, $\varepsilon' = n^2 - \kappa^2$, $\varepsilon'' = 2n\kappa$, где $n,\ \kappa$ – показатели преломления и поглощения.

Радиояркостная температура подстилающей поверхности, включающей в себя участки с разными излучательными характеристиками, может быть рассчитана на основе принципа суперпозиции по формуле

$$T_B = \sum_{j=1}^{n} T_B^j S_j,$$

где T_B^j , S_j – радиояркостные температуры отдельных участков, а также их площади.

Радиояркостная температура отдельного *i*-того участка площадью S_i при известных значениях T_B^j может быть рассчитана по формуле

$$T_B^i = \left(T_B - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n} T_B^j S_j \right) / S_i$$

Соответственно, зная площадь солончака и рассчитав его яркостную температуру на основе изученной сезонной и суточной динамики можно учесть его вклад в суммарную яркостную температуру пикселя.

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

Засолённость почвы определяли по формуле $\boldsymbol{Z = M_c/M}$.

Массовую концентрацию соли в растворе S определяли по формуле $\boldsymbol{S = M_c/M_р}$, где $M_р = M_с + M_в$ – масса раствора, $M_с, M_в$ – массы безводной соли, воды.

[10]. Шутко А. М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. 190 с.
[11]. Шарков Е. А. Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы. В 2 т. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 548 с.

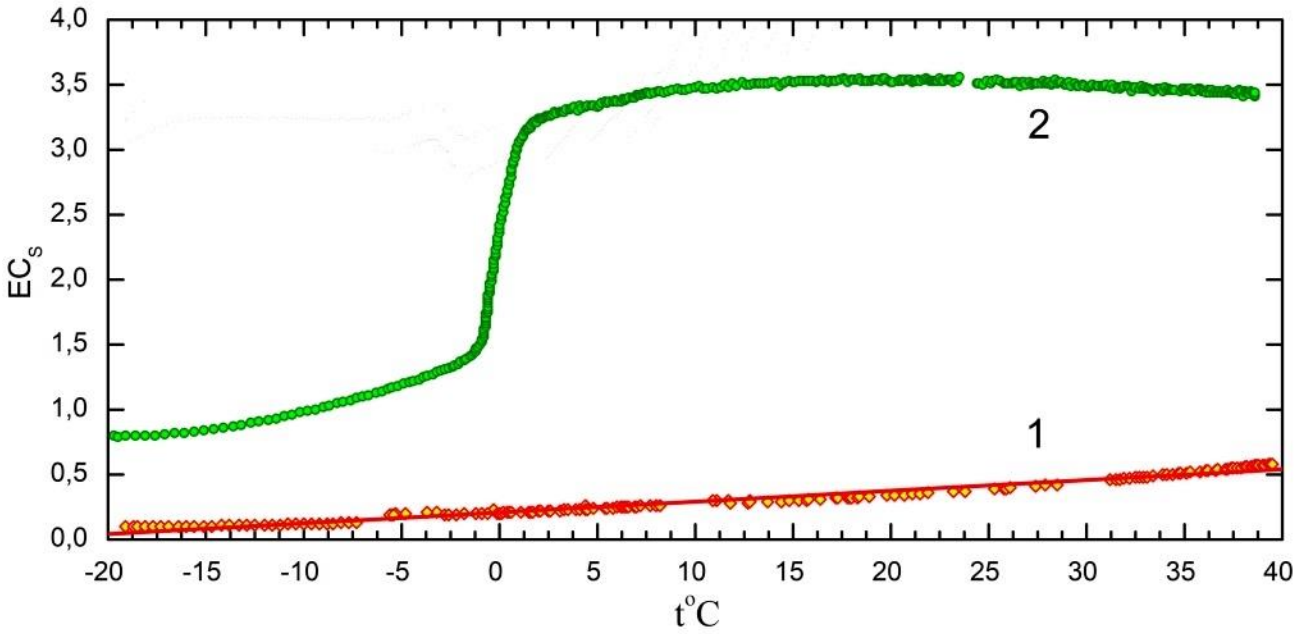


Гранулометрический состав солончакового грунта (в %).

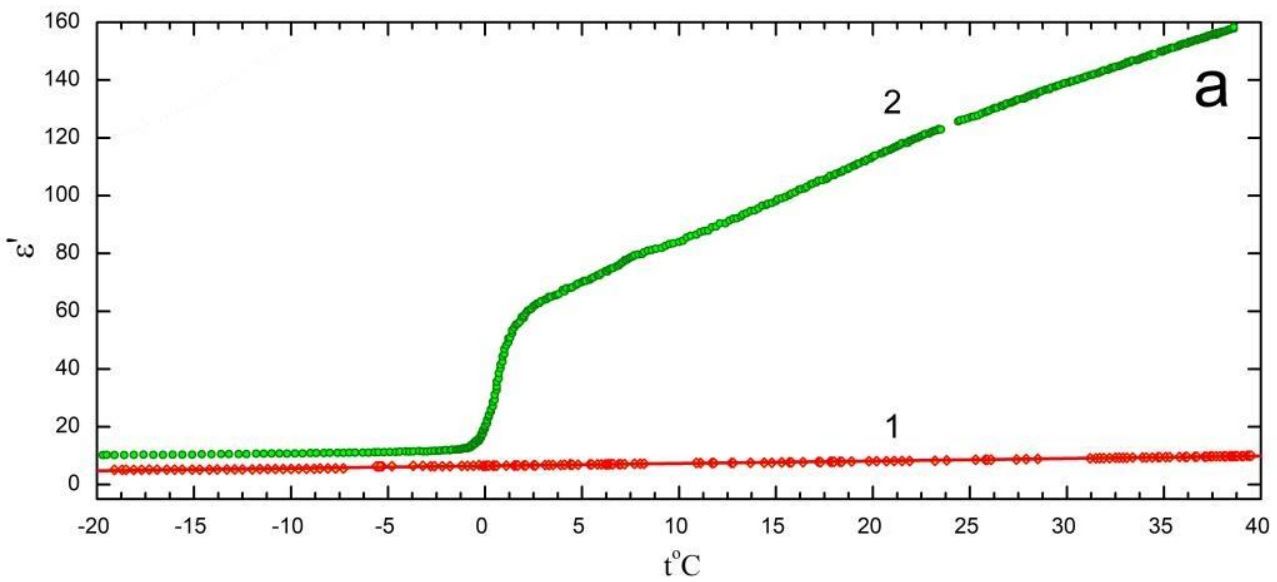
Размер частиц, мм	1-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	ил (<0,001)	Сумма (<0,01)
%	21,84	64,31	<0,01	0,04	1,12	12,68	13,84

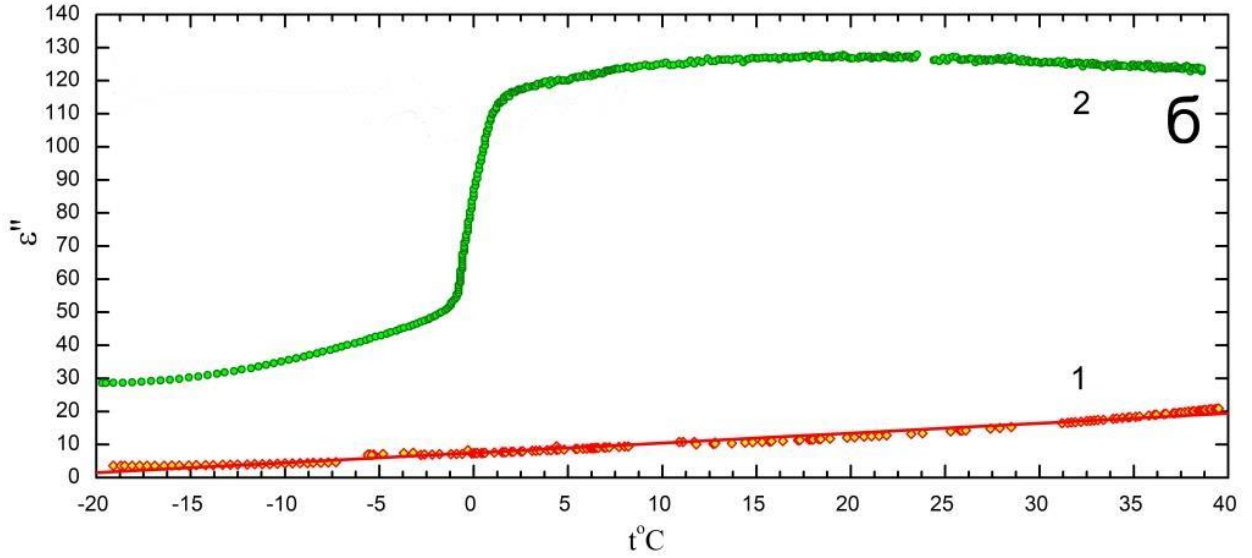
Массовые концентрации и ионный состав солончакового грунта (мг/кг).

CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^++K^+	Сумма солей
<21	259,3	167 282,5	2 959,2	210,0	1 818,0	107 718,2	280 247,1

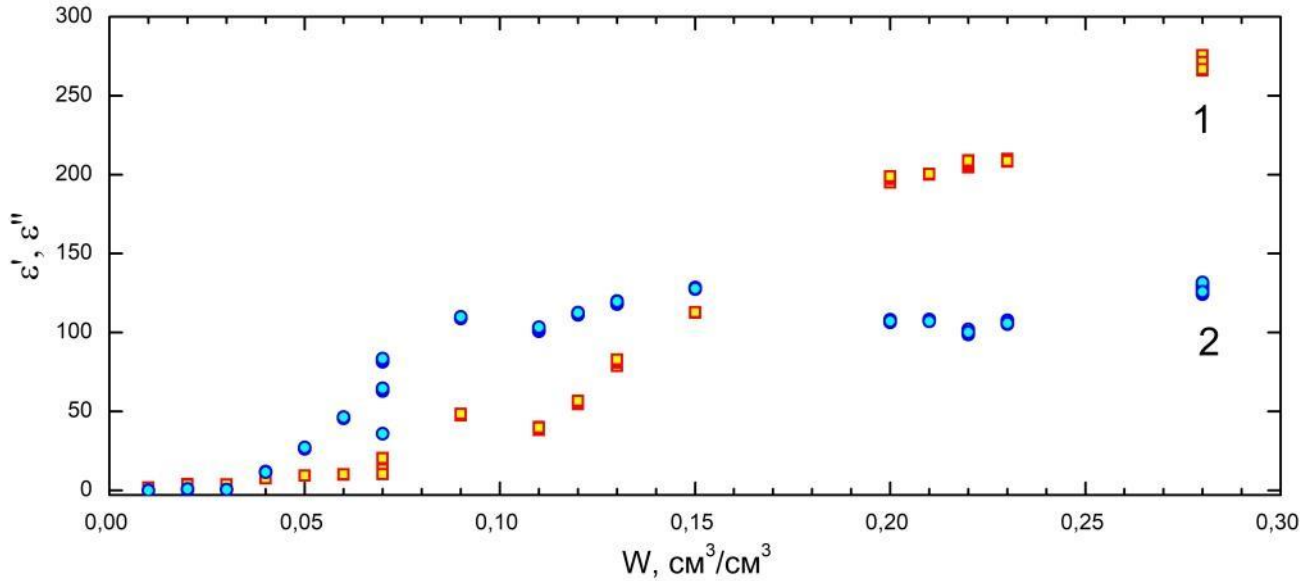


Зависимости EC_S от температуры солончакового грунта с разной объёмной влажностью: 1 – 0,04; 2 – 0,21 $см^3/см^3$; сплошная линия – линейная аппроксимация

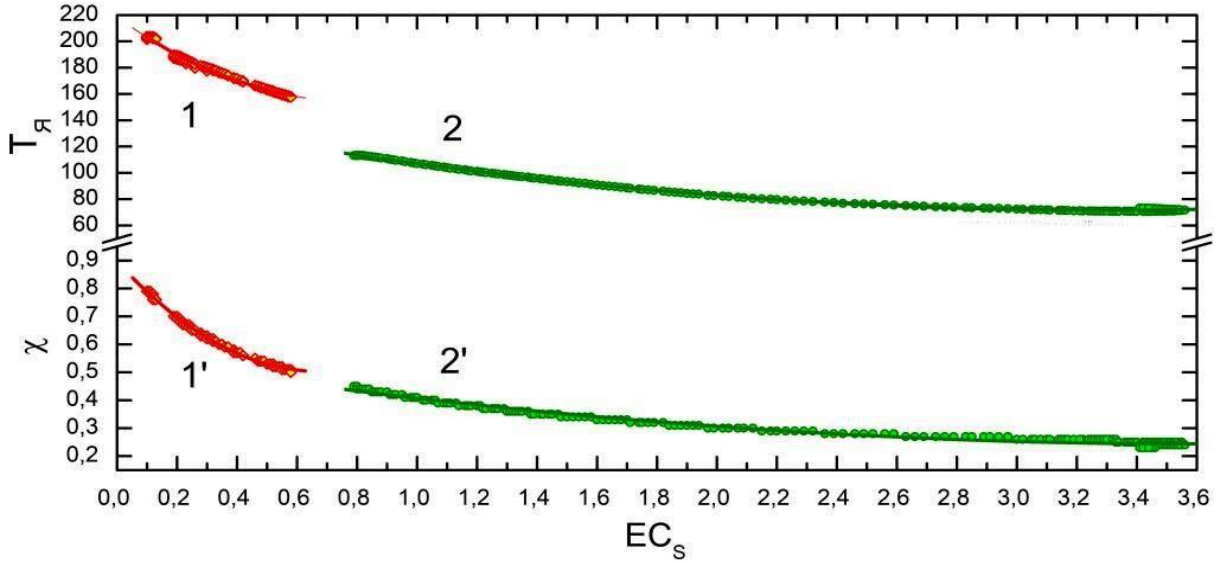


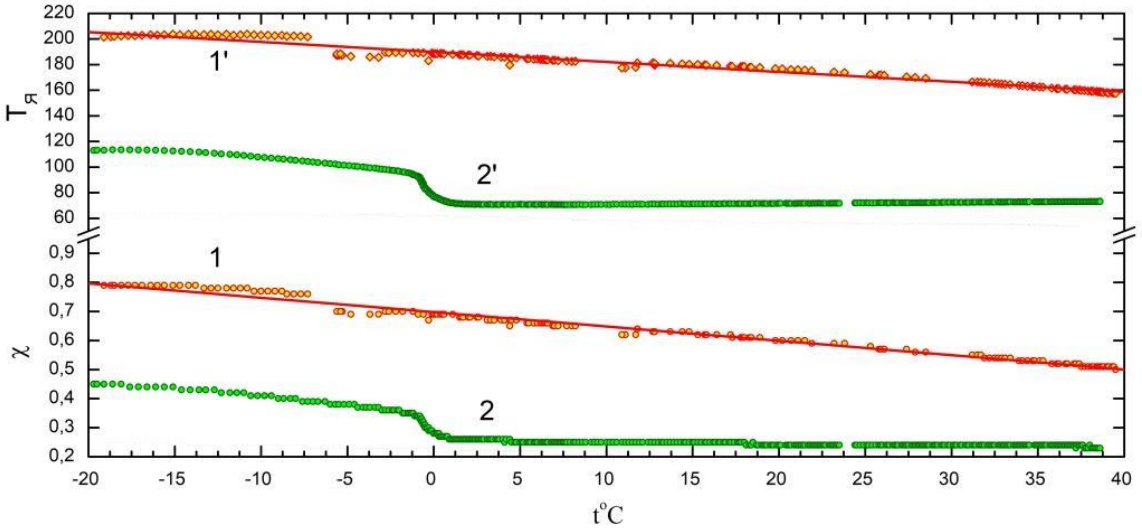


Зависимости ε' (а) и ε'' (б) от температуры солончакового грунта с разной объёмной влажностью:
1 – 0,04 см^3/см^3; 2 – 0,21 см^3/см^3; сплошные линии – линейная аппроксимация

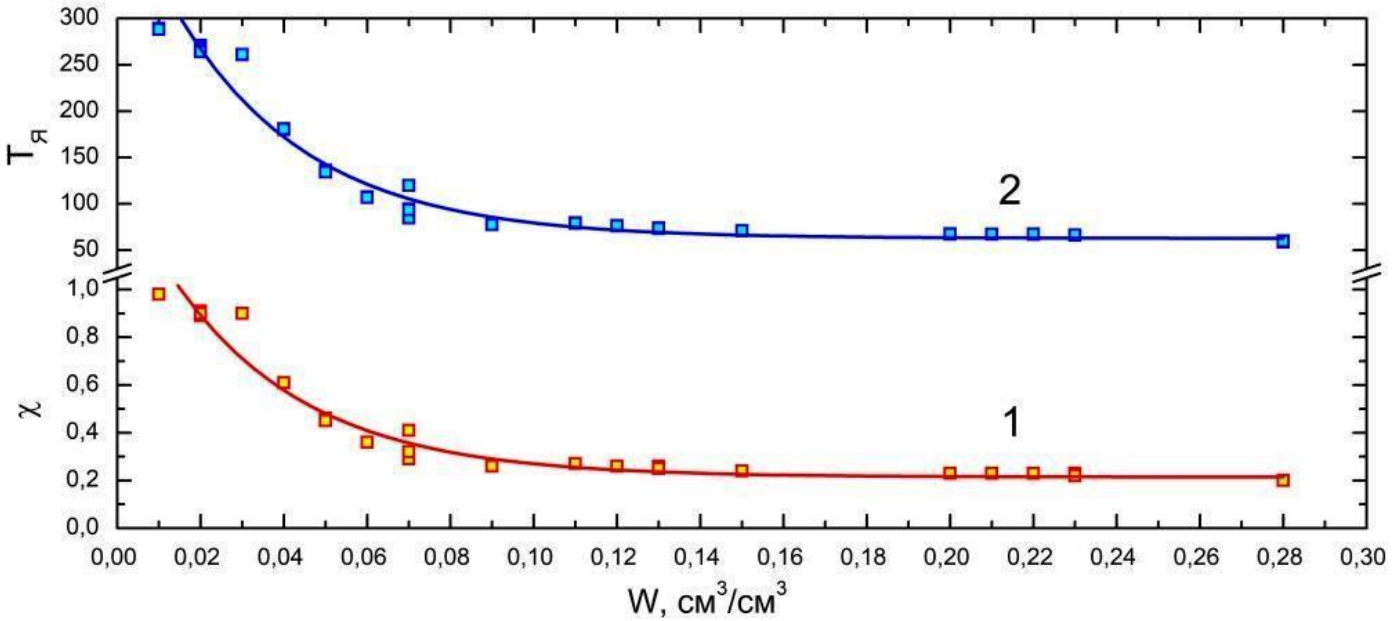


Зависимости ε' (1), ε'' (2) от объёмной влажности (W) солончакового грунта при $t = 22 \pm 2$°C





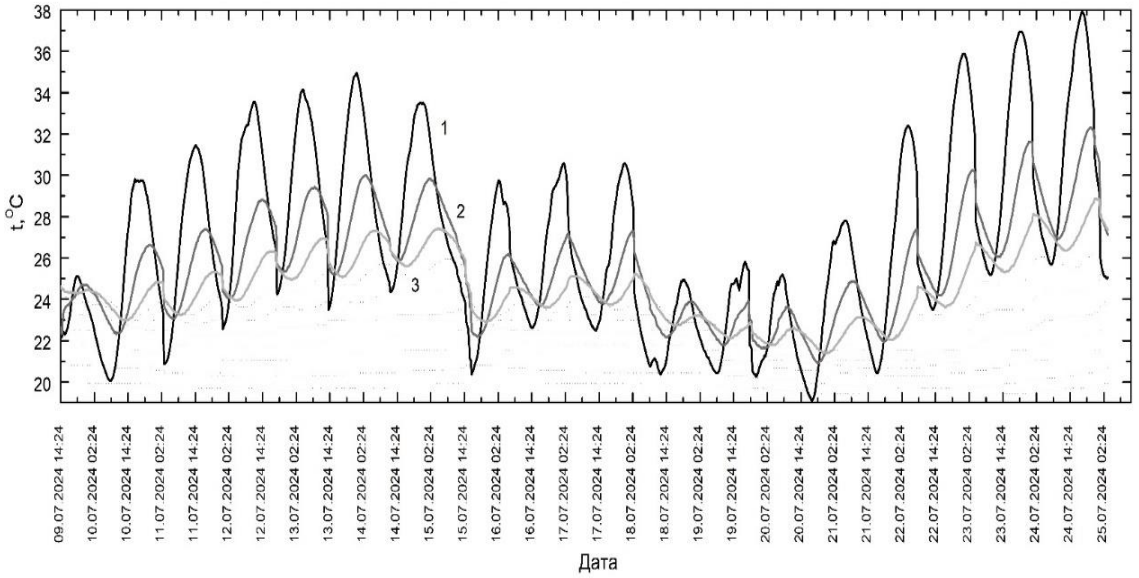
Зависимости χ (1, 2) и $T_я$ (1′, 2′) от температуры солончакового грунта с разной объёмной влажностью: (1, 1′) – 0,04 см^3/см^3; (2, 2′) – 0,21 см^3/см^3; сплошные линии – аппроксимационные зависимости



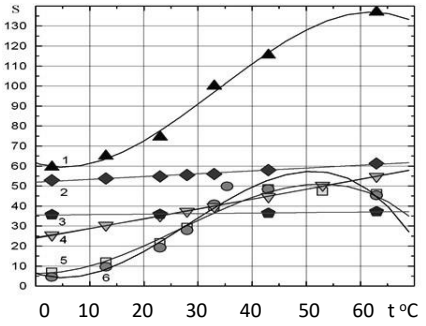
Зависимости χ (1) и $T_я$ (2) от объёмной влажности

Сульфатно-хлоридный солончак «Мормышанский»





Летняя динамика температуры Мормышанского солончака:
1– 0-1 см; 2– 10 см; 3 – 20 см.



Растворимость солей при разных температурах
1 – Na_2CO_3; 2 – Na_2SO_4; 3 – $CaCl_2$; 4 – $MgSO_4$; 5 – $MgCl_2$; 6 – NaCl.
Рабинович. В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник, 3-е изд., СПб, Химия, 1978. 392 с.

Гранулометрический состав солончакового грунта (%)

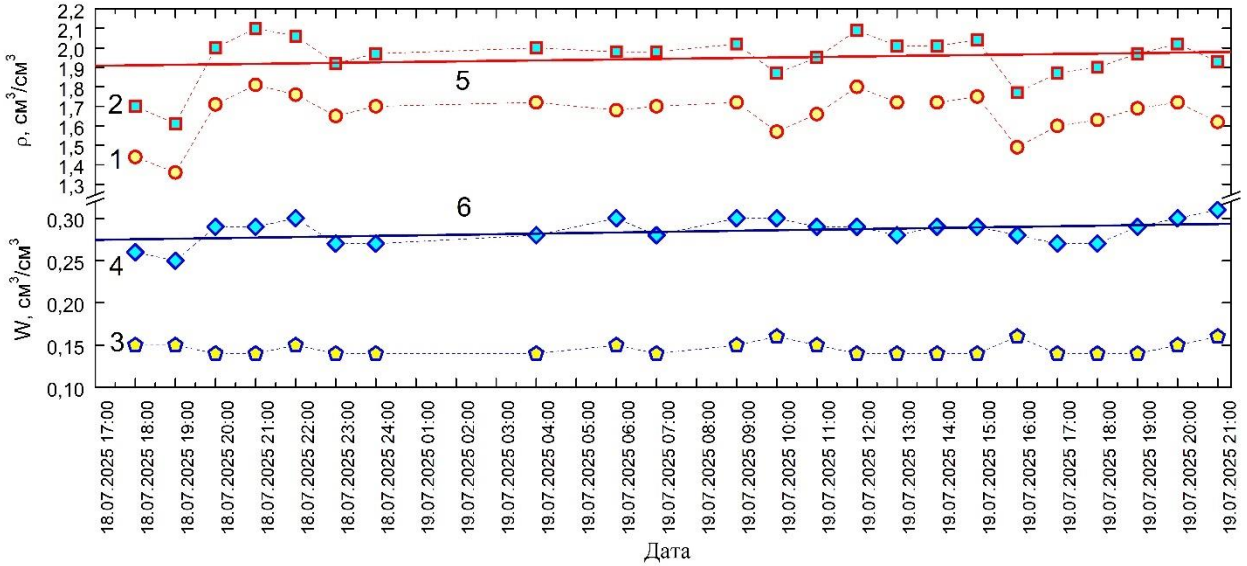
Слой	Глубина отбора, см	Размер частиц, мм						
		1-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	ил(<0,001)	Сумма (<0,01)
2	0,3-5 см	4,05	61,79	19,68	1,24	2,24	11,0	14,48
3	5-10 см	4,65	73,03	11,16	0,08	1,12	9,96	11,16

Ионный состав солончакового грунта в разные периоды года (мг/кг): 1 – 0-0,3 см (корка соли); 2 – 0,3-5 см (грунт); 3 – 5-10 см (грунт)

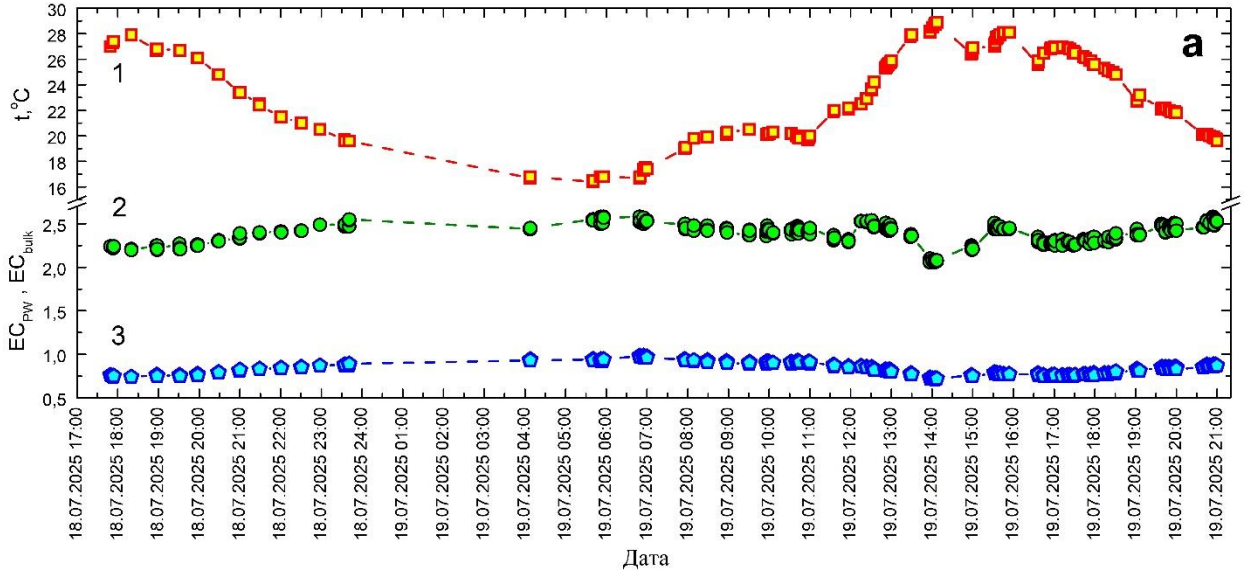
Дата отбора	Слой	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^++K^+	Сумма солей
28.07.2025	1	600,0	3 324,5	23 856,0	5 596,5	120,0	1 152,0	17 726,0	52 375,0
28.07.2025	2	60,0	1 067,5	9 471,0	2 272,6	50,0	318,0	7 094,2	20 333,3
28.07.2025	3	90,0	1 006,5	17 381,0	3 516,0	80,0	420,0	12 658,0	35 151,5
29.11.2025	1	240,0	1 403,0	6 489,0	2 686,4	90,0	354,0	5 482,4	16 744,9
29.11. 2025	2	180,0	640,5	10 689,0	3 452,0	100,0	384,0	8 206,8	23 652,3
29.11. 2025	3	45,0	686,3	10 164,0	2 534,0	80,0	264,0	7 588,7	21 362,0

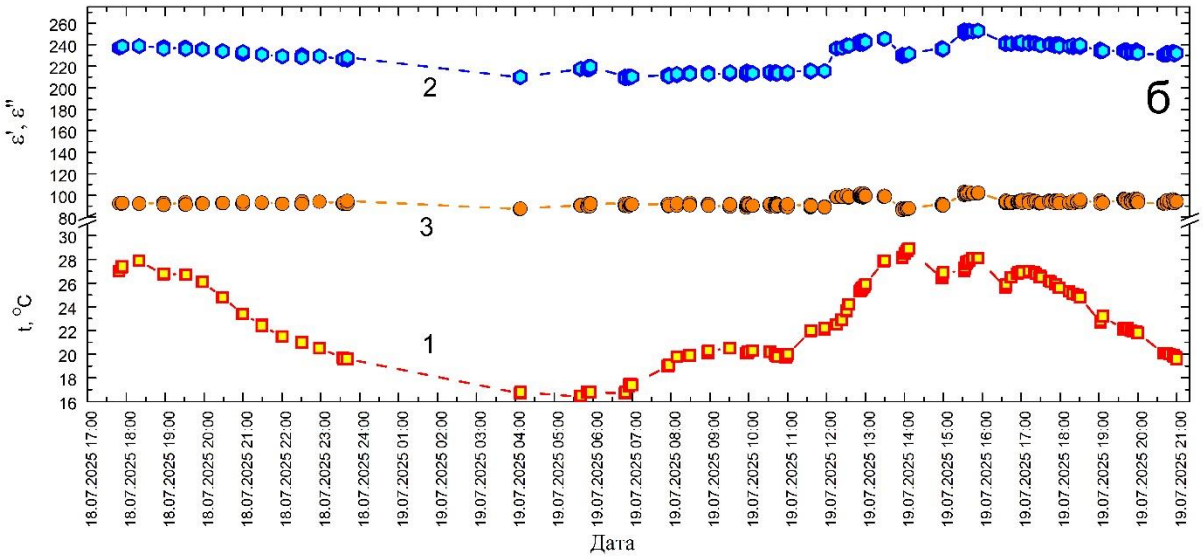
Глубинное строение солончака, прилегающего к гиперсолёному озеру Мормышанское (Алтайский край), в разные периоды года



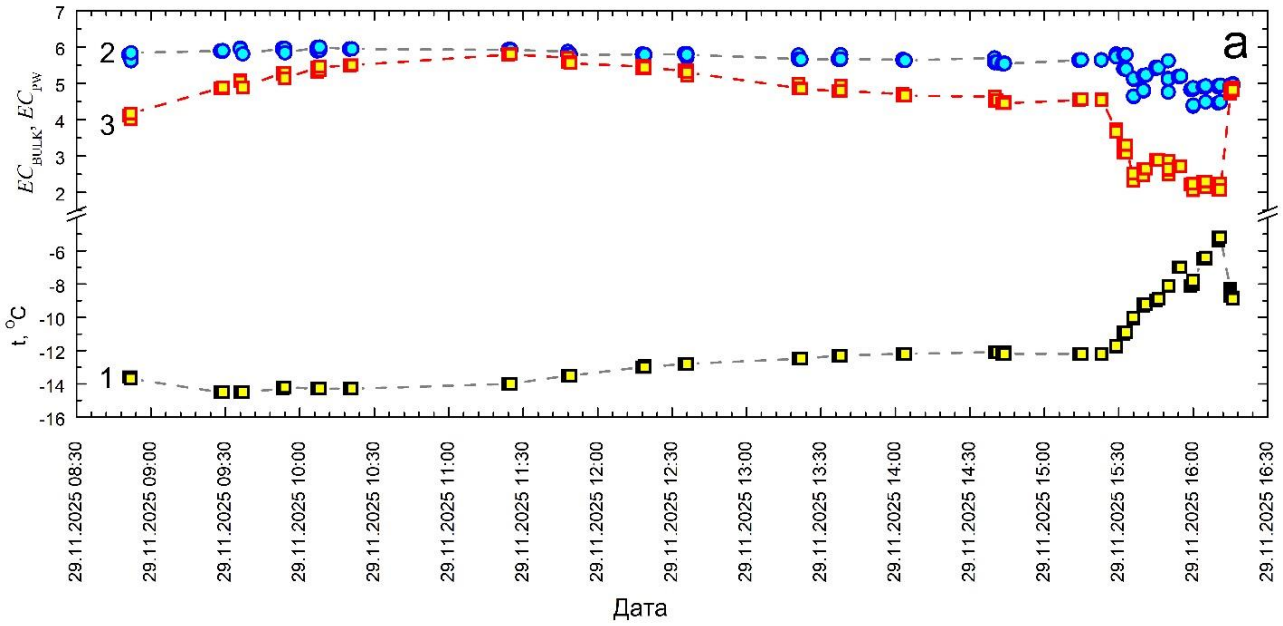


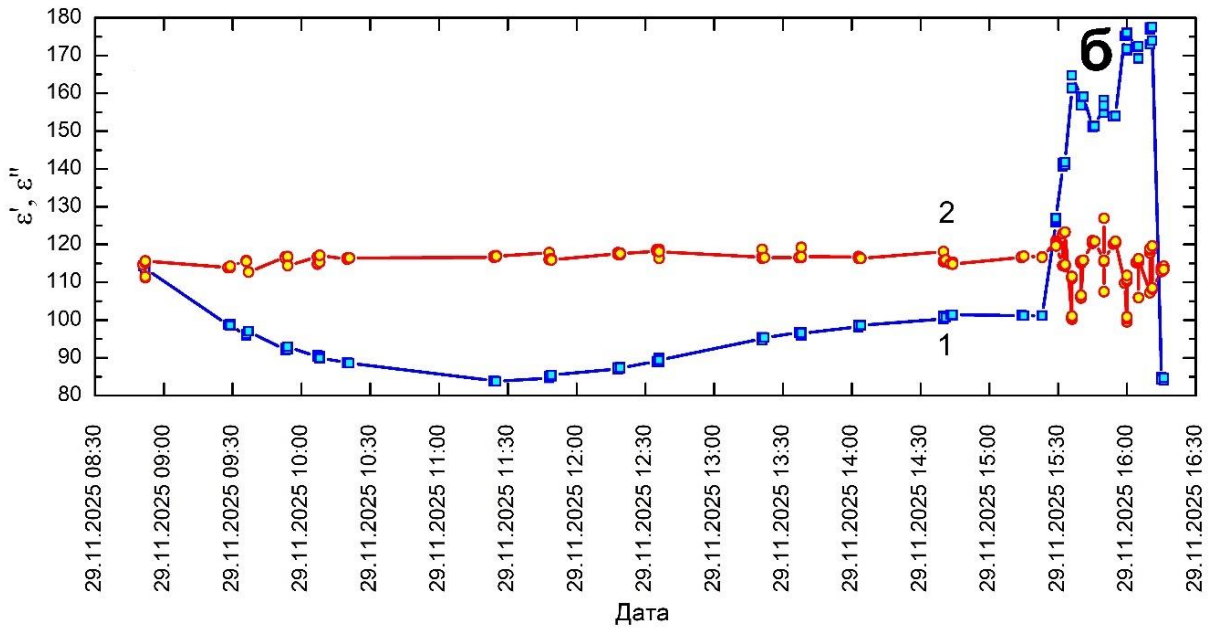
Суточная динамика влажности и плотности солончакового грунта в слое 0-5 см: 1, 2 – плотности сухого и влажного образцов солончакового грунта; 3, 4 – массовая и объёмная влажности солончака

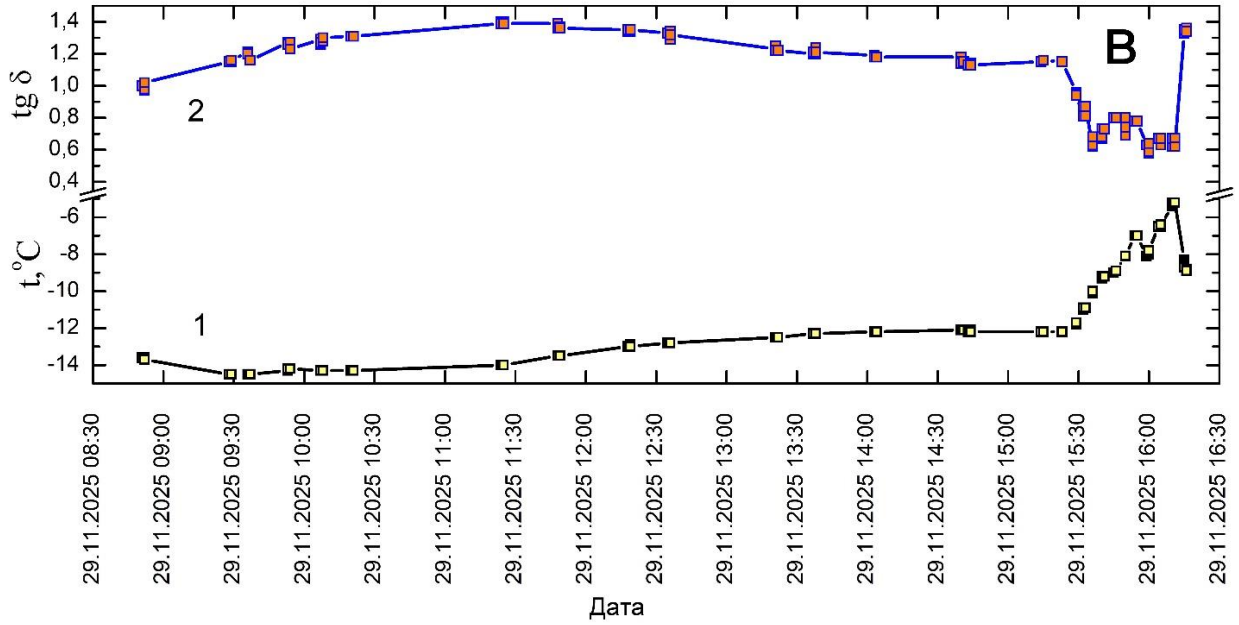




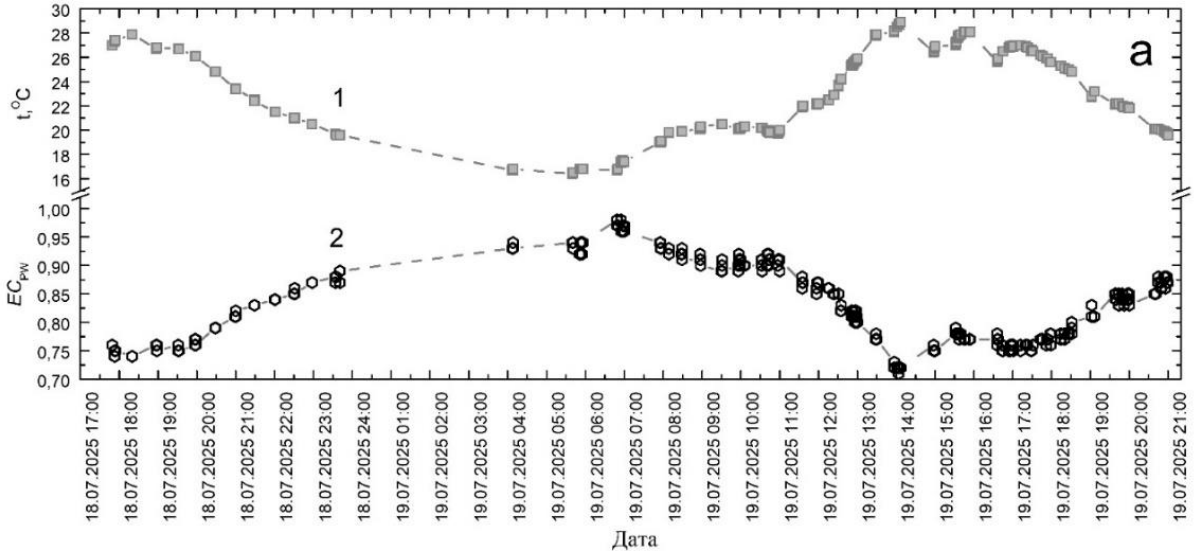
Суточная динамика t (1а, 1б), EC_{bulk} (2а), EC_{PW} (3а), ε' (2б) и ε'' (3б) солончакового грунта на частоте 50 МГц.

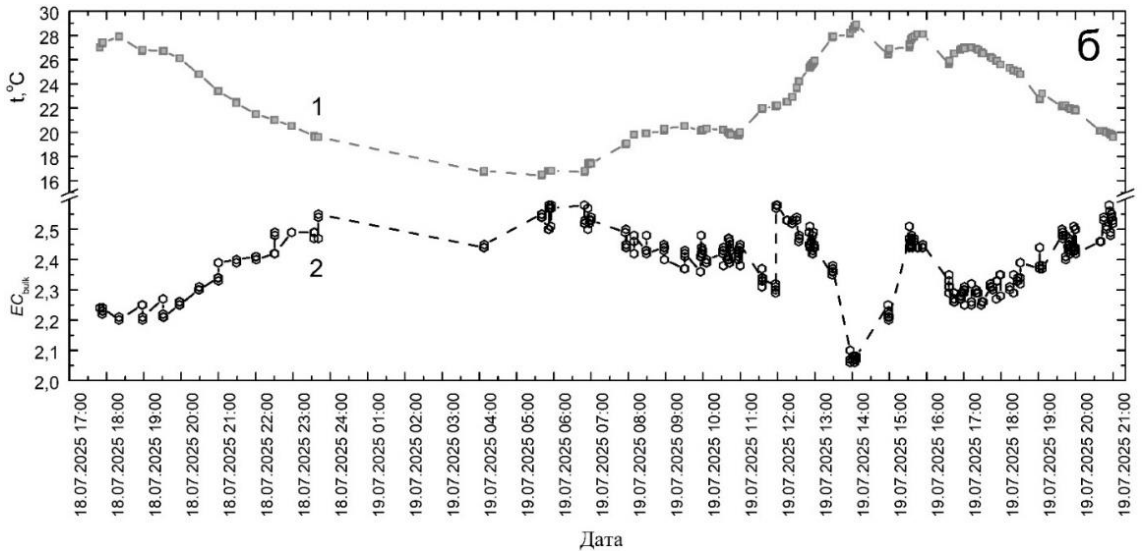




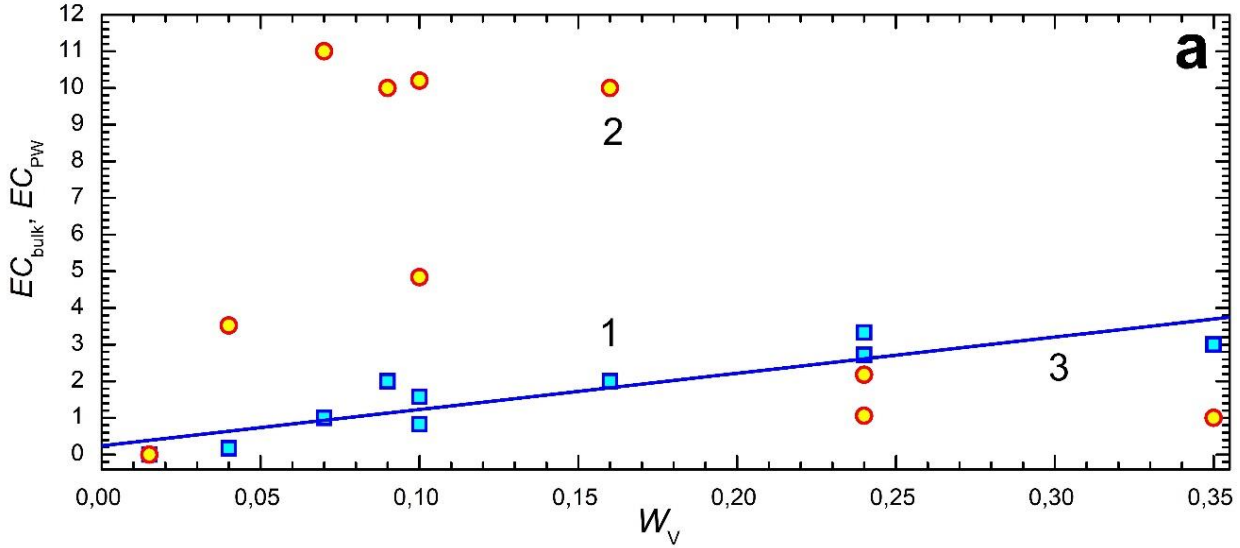


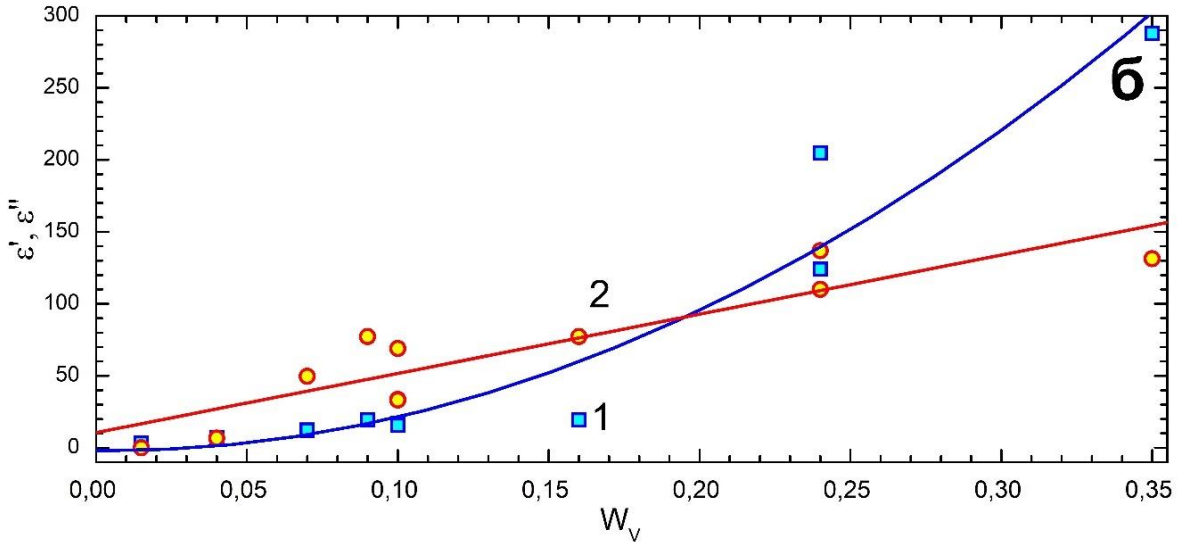
Зависимости EC_{bulk} (1а), EC_{PW} (2а), ε'(1б) ε''(2б), $tg\ \delta$ (в) от температуры





Суточная динамика термодинамической температуры (1а-б), электропроводности поровой влаги EC_{PW} (2а) и объёмной электропроводности почвы EC_{bulk} (2б).

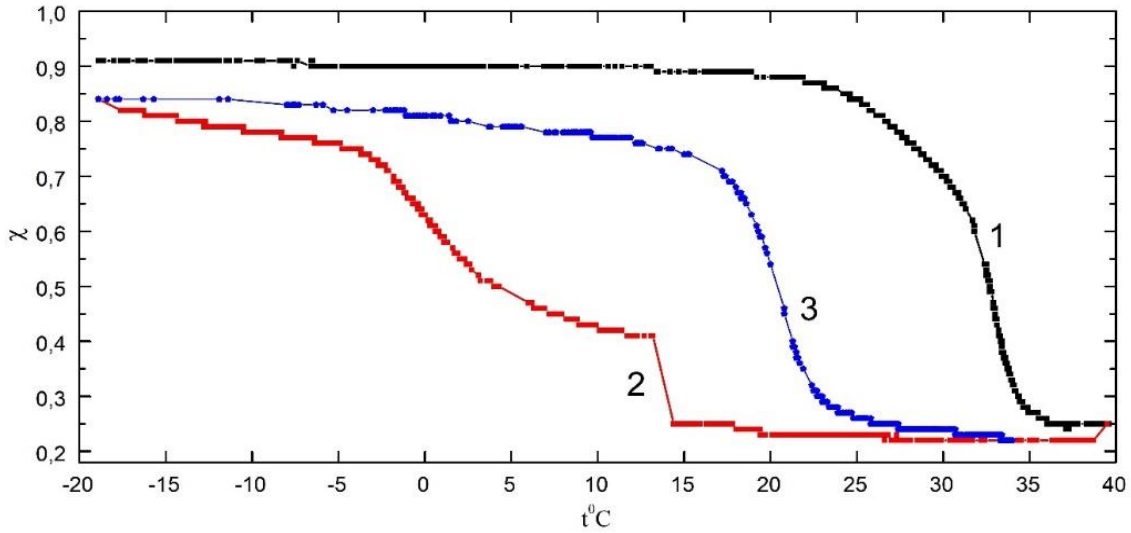


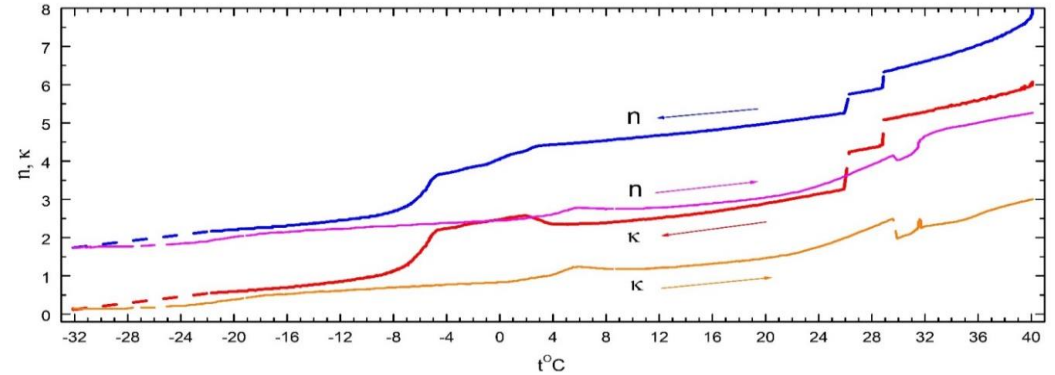


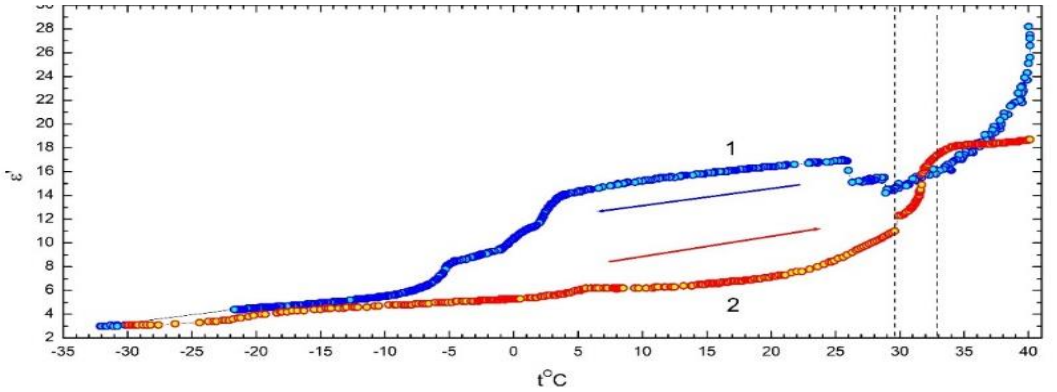
Зависимости EC_{bulk} (1а), EC_{PW} (2а), ε'(1б) ε''(2б) от объёмной влажности

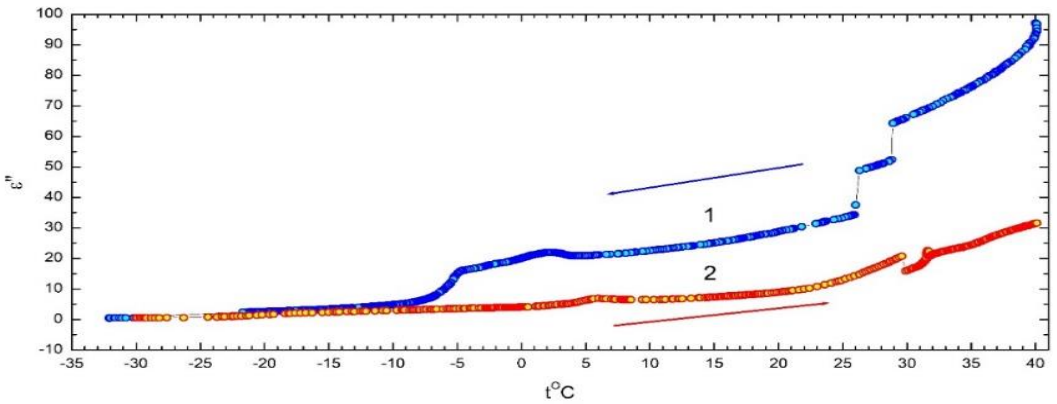
Содовый солончак на осушенном берегу гиперсолёного озера Танатар











<u>Лабораторные измерения:</u>

Гистерезис КДП, показателей преломления и поглощения, коэффициента излучения солончакового грунта (корки соли – «содового льда» (Танатар) с влажностью W=0.35 $см^3/см^3$

Содовый солончак на берегу озера Петухово





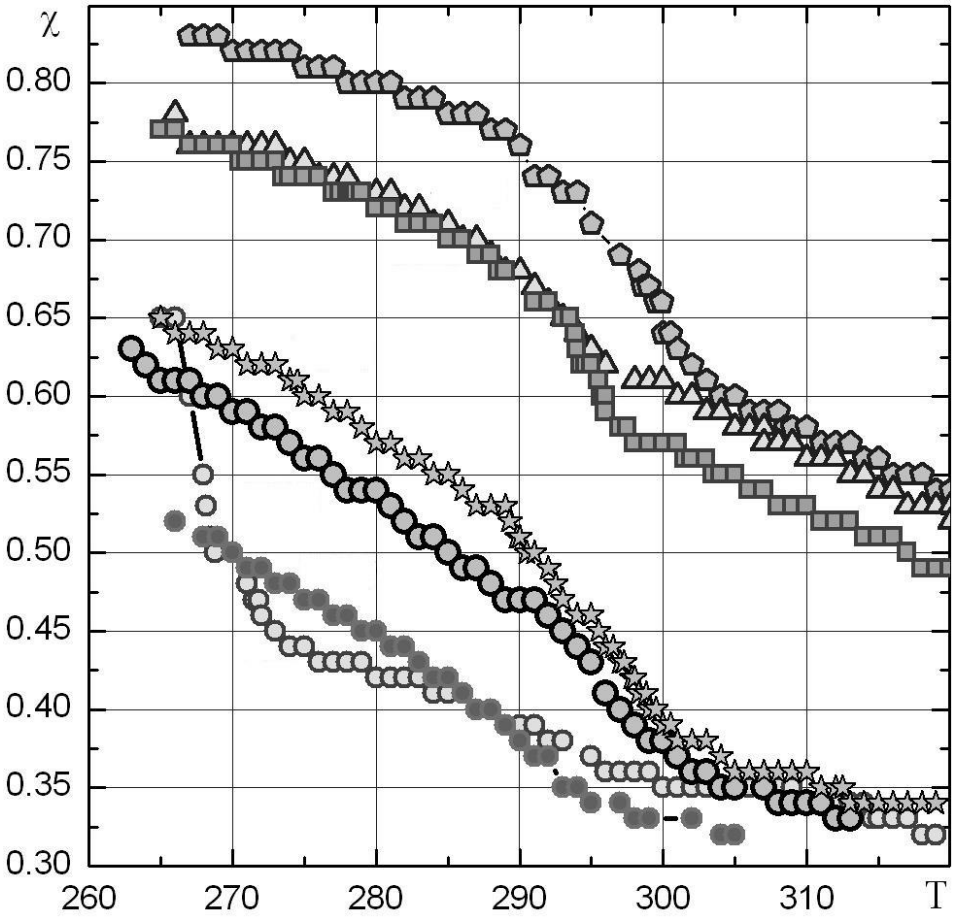




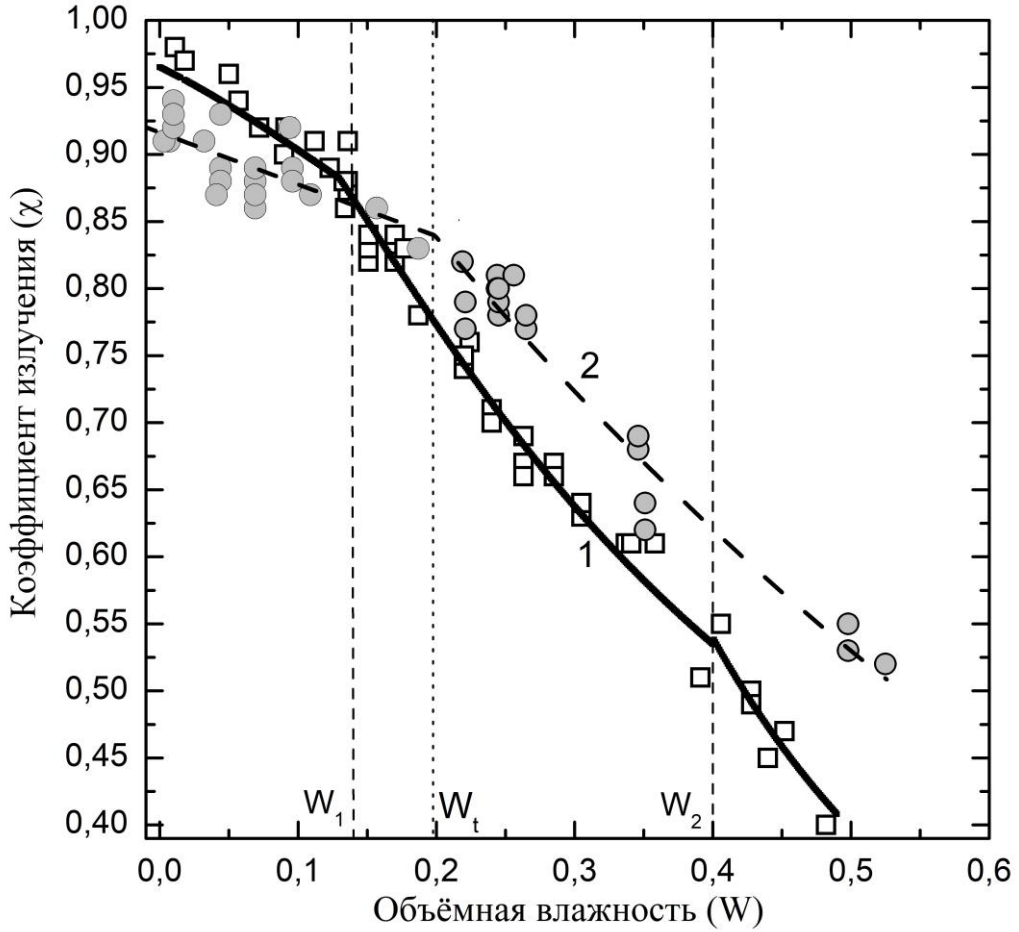


Фотографии одного и того же участка поверхности солончака в разное время суток

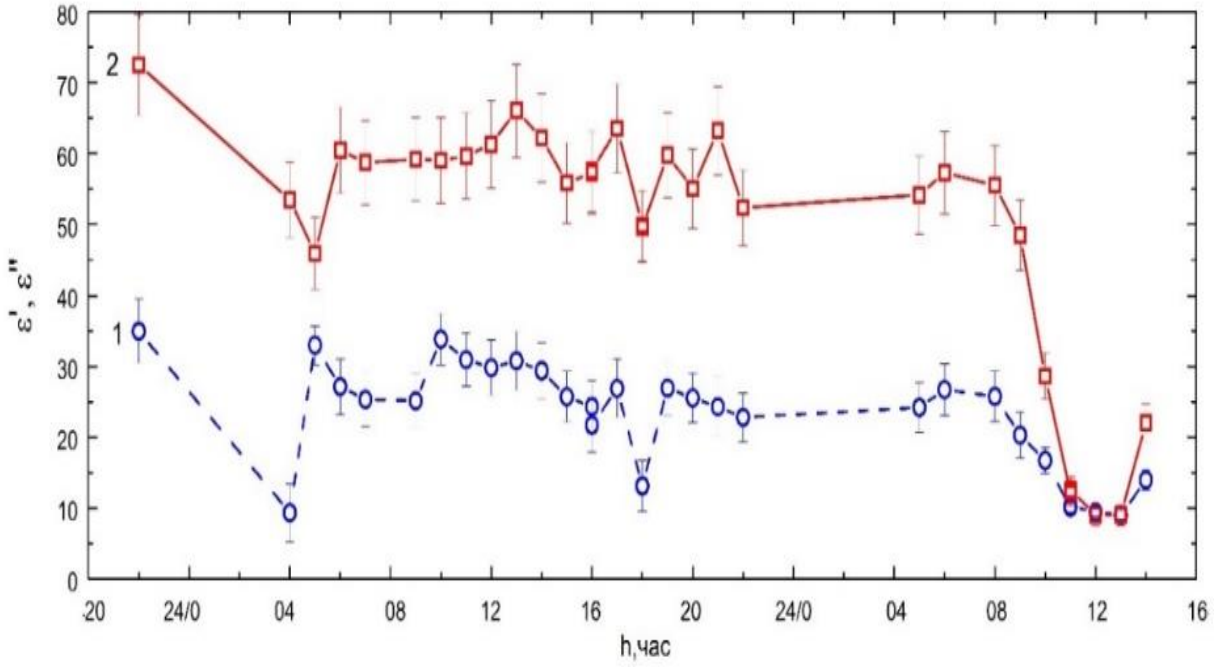
Зависимости коэффициента излучения χ от температуры в разное время суток для одного и того же участка солончака



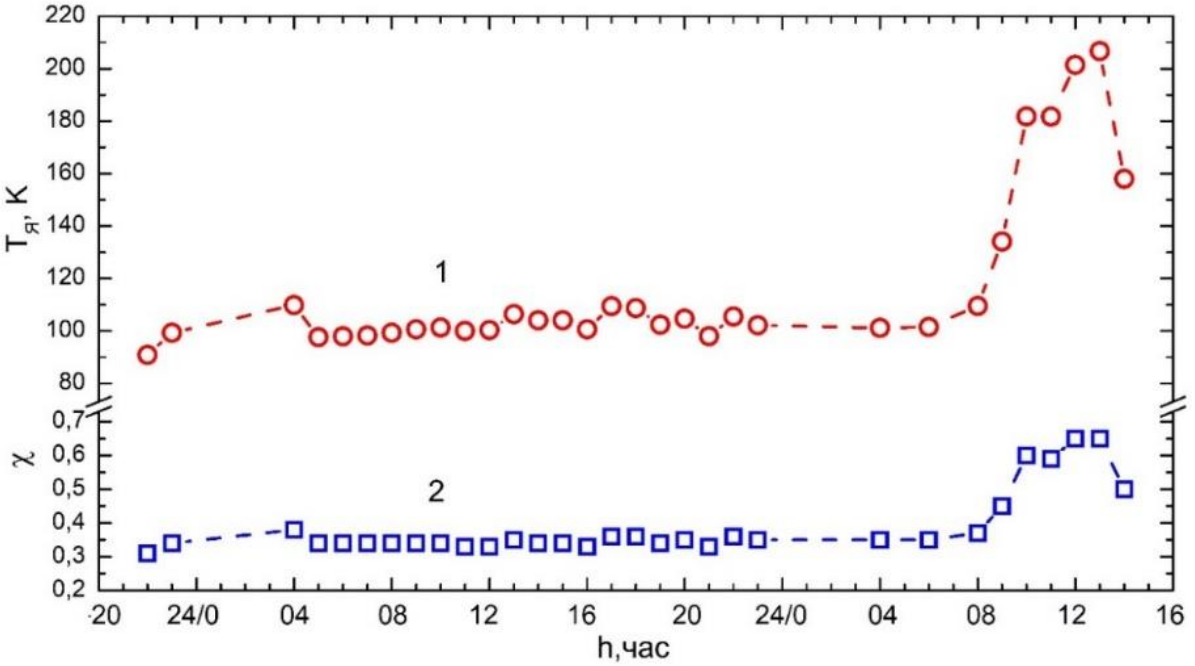
Зависимости коэффициента излучения χ от объёмной влажности:
1 - солончаковый грунт; 2 – промытый солончаковый грунт.



Значительные вариации χ (T, W), наблюдаемые в течение нескольких часов, ставят под сомнение возможность объективного и надёжного дистанционного микроволнового мониторинга солончаков.



Суточные вариации действительной (1) и мнимой (2) частей комплексной диэлектрической проницаемости солончакового грунта на частоте 1.41 ГГц.



Суточные вариации радиояркостной температуры (1) и коэффициента излучения (2) на частоте 1.41 ГГц.

Массовые концентрации и ионный состав солончакового грунта (мг/кг).

	Шифр пробы	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
	Пет. солонч. 28.02.2026	31560,0	68930,0	15890,0	1591,6	50,0	18,0	61298,6	179338,3

Из анализа экспериментальных данных следует, что электрофизические и диэлектрические характеристики солончаковых грунтов с разным типом почвенного засоления зависят от совокупного влияния термодинамической температуры, объёмной влажности, массовых концентрации и типов растворённых солей.

Причинами этих различий являются изменения компонентного состава солончакового грунта, происходящие при вариациях температуры и влажности и различные для солончаков с разной массовой концентрацией и типом минеральных солей, растворённых в почвенной влаге, в том числе:

1) объёмной доли связанной воды, адсорбированной на почвенных частицах,

2) солёности почвенно-грунтовой влаги (от насыщенного раствора до разбавленного раствора),

3) объёмной доли нерастворённых солей, находящихся в осадке.

Перечисленные компоненты характеризуются разными диэлектрическими параметрами, в соответствии с которыми наблюдаются изменения радиоизлучательных характеристик солончаков.

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/ .

Спасибо за внимание