

## Анализ гидрологических изменений минеральных озёр в Северной Евразии по данным спутника SMOS

А. Н. Романов, И. В. Хвостов, И. В. Рябинин, Д. А. Романов

*Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, 656038, Россия  
E-mails: romanov\_alt@mail.ru, nii@mail.ru, cgsienna@gmail.com*

Происходящие в Северной Евразии климатические изменения, особенно обострившиеся в последние несколько десятилетий, в совокупности с антропогенным воздействием на экосистемы вызывают заметные изменения гидрологических характеристик минеральных озёр. По результатам ежедневных измерений радиояркостной температуры  $T_{\text{я}}$  со спутника SMOS (*англ.* Soil Moisture and Ocean Solution) изучена многолетняя сезонная динамика гидрологических изменений некоторых крупных минеральных озёр Северной Евразии (Каспийское море, зал. Кара-Богаз-Гол, Аральское море, озёра Сарыкамышское, Кулундинское, Убсу-Нур) с 2012 по 2022 г. Анализ сезонной и межгодовой динамики  $T_{\text{я}}$  и термодинамической температуры подстилающей поверхности выполнен на основе продуктов SMOS L1C и MODIS MOD11A1 (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) соответственно. Выделены четыре периода с разным поведением радиоизлучательных характеристик минеральных озёр, связанным с падением температуры ниже точки замерзания солёной воды, образованием и таянием ледового покрова на поверхности воды, изменением площади водного зеркала, солёности воды. В северной части Каспийского моря отмечено влияние фенологических фаз ледового покрова на изменение микроволнового излучения подстилающей поверхности. Изучены особенности микроволнового излучения западной (глубоководной) и северной частей Аральского моря. Сезонная динамика  $T_{\text{я}}$  связана с процессами образования ледового покрова на водной поверхности. Судя по изменившейся сезонной динамике  $T_{\text{я}}$ , произошла трансформация Сарыкамышского оз., превратившегося в круглогодично незамерзающий водоём. Выявлены особенности сезонной динамики  $T_{\text{я}}$  для оз. Убсу-Нур, которые могут быть связаны с дождевыми осадками в зимне-весенний сезон, а также с ранним вскрытием рек и затоплением ледового покрова озера речной водой.

**Ключевые слова:** солёные озёра Северной Евразии, дистанционное зондирование, микроволновый диапазон, радиояркостная температура, спутник SMOS

Одобрена к печати: 02.12.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-222-233

### Ведение

Минеральные озёра, широко распространённые на земном шаре и встречающиеся в разных регионах мира, чрезвычайно чувствительны к изменениям климата. Своеобразными индикаторами климатических изменений выступают уровень воды в них и площадь водной поверхности (Yan, Zheng, 2015). В маловодные периоды незначительные по площади озёра могут частично или полностью пересыхать (Moore, 2016; Waiser, Robarts, 2009). Усыхание крупных озёр оказывает влияние на многие атмосферные и гидросферные процессы, происходящие в региональном и глобальном масштабах. Атмосферный перенос токсичных солей с поверхности воды и высохшего дна озера способствует увеличению засоленности почв, что, в свою очередь, ведёт к угнетению растительного покрова, изменению видового состава растительности и опустыниванию (Kamilli et al., 2016).

Оперативная информация о гидрологических изменениях крупных минеральных озёр, имеющая большое значение при планировании мероприятий по защите окружающей среды, адаптации общества к новым условиям жизнедеятельности, может быть получена на основе методов космического мониторинга (Poursanidis, Chrysoulakis, 2018; Singh et al., 2018). Важной задачей представляется изучение многолетней сезонной динамики радиояркостной температуры  $T_{\text{я}}$ (JD) (*англ.* Julian Day, юлианский день) подстилающей поверхности в разных регионах Северной Евразии, зависящей от метеорологических условий, а также от площади

и радиоизлучательных характеристик разных ландшафтов (водная поверхность, обнажившееся дно высохшего озера, почвенный покров, лесной массив) (Panciera et al., 2011).

Микроволновое излучение подстилающей поверхности, включающей в себя минеральное озеро, может изменяться в значительных пределах. Так, например,  $T_{я}$  высыхающего солёного оз. Эйр (Австралия), определённая по данным спутника SMOS (*англ.* Soil Moisture and Ocean Solution), изменяется в течение сезона от  $T_{я}$  водной поверхности до  $T_{я}$  сухой почвы (Rüdiger et al., 2014). С использованием спутниковых данных ALOS PALSAR (*англ.* Advanced Land Observing Satellite; *англ.* Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar) околнута береговая линия высохшего оз. Лоп-Нур, расположенного в восточной части Таримской котловины на северо-западе Китая (Shao et al., 2014). Для дистанционного мониторинга высыхания минеральных озёр применяются данные EOS/MODIS (MOD13Q1) (*англ.* Earth Observing System/Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Wang et al., 2012), Landsat-5 TM и Landsat-8 (Gorji et al., 2017). В работе (Romanov et al., 2017) исследованы сезонные вариации  $T_{я}$  минеральных озёр, площадь которых меньше площади пикселя SMOS. Показано, что сезонные вариации  $T_{я}$  зависят от физической температуры, солёности воды, а также от наличия и толщины ледового покрова, образующегося в холодный период на поверхности воды.

### Методика исследований

Основными объектами исследования выступали крупные минеральные озёра Северной Евразии, различающиеся по площади водного зеркала, солёности воды, концентрации и типу растворённых солей, расположенные в разных природных зонах, на разной высоте над уровнем моря (северная и южная части Каспийского моря, зал. Кара-Богаз-Гол, участки Аральского моря после катастрофического усыхания, озёра Сарыкамышское, Кулундинское и Убсу-Нур) (*рис. 1*).



*Рис. 1.* Карта-схема расположения тестовых участков в Северной Евразии. 1, 2 — северная и южная части Каспийского моря; 3 — зал. Кара-Богаз-Гол; 4 — Сарыкамышское оз.; 5, 6 — западная и северная части Аральского моря; 7 — оз. Кулундинское; 8 — оз. Убсу-Нур

Микроволновое излучение подстилающей поверхности, регистрируемое датчиками 2D-радиометра MIRAS (*англ.* Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis) (1,41 ГГц)

и откалиброванное в единицах радиояркостной температуры ( $T_{\text{я}}$ ), извлекалось из продуктов SMOS (Wigneron et al., 2014) уровня обработки L1C версии v620 (Gutierrez et al., 2014). В данном исследовании приводятся значения  $T_{\text{я}}$ , измеренные на горизонтальной поляризации под углом зондирования  $42,5^\circ$ . Продольное и поперечное пространственное разрешение радиометра составляет 64 и 35 км соответственно. Данные L1C географически привязаны к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4H9 (англ. Discrete Global Grid Snyder Icosahedron grid with equal area) (Sahr et al., 2003). Линейный размер ячеек этой сетки составляет 16 км, площадь —  $195 \text{ км}^2$ . Значение  $T_{\text{я}}$  для любой ячейки в продукте L1C определяется участком земной поверхности площадью  $1760 \text{ км}^2$ .

Для однородной слабошероховатой подстилающей поверхности  $T_{\text{я}}$  может быть рассчитана по формуле (Njoku, Kong, 2014; Sharkov, 2003; Ulaby et al., 1986):

$$T_{\text{я}} = \chi T,$$

где  $\chi$ ,  $T$  — коэффициент излучения и физическая температура подстилающей поверхности.

При попадании в геодезическую сетку участков с разными радиоизлучательными характеристиками (озёра, береговые зоны и прилегающие к ним участки суши со слабо развитой растительностью) измеренные значения  $T_{\text{я}}$  представляют собой суперпозицию  $T_{\text{я}}^j$  этих участков с учётом вклада их площадей в суммарную площадь излучающего участка поверхности (Roy et al., 2016). В этом случае  $T_{\text{я}}$  может быть рассчитана по формуле:

$$T_{\text{я}} = \sum_{j=1}^n T_{\text{я}}^j S_j,$$

где  $T_{\text{я}}^j$ ,  $S_j$  — радиояркая температура и площадь отдельных участков.

Соответственно,  $T_{\text{я}}^i$  отдельного  $i$ -го участка площадью  $S_i$  при известных значениях  $T_{\text{я}}^j$  и  $S_j$  для остальных участков может быть рассчитана по формуле:

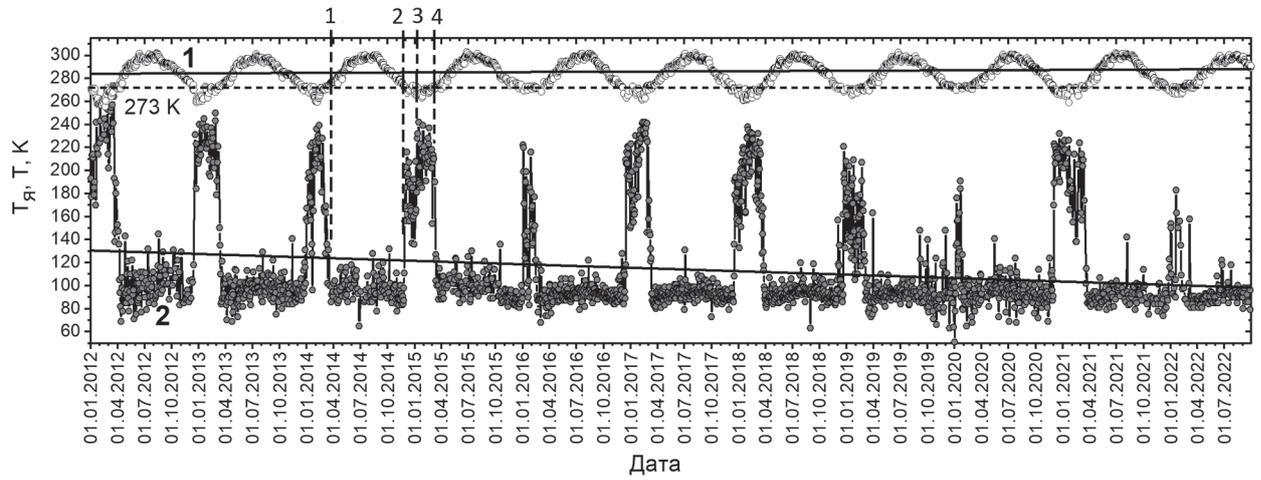
$$T_{\text{я}}^i = \frac{\left( T_{\text{я}} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n T_{\text{я}}^j S_j \right)}{S_i}. \quad (1)$$

## Результаты исследований

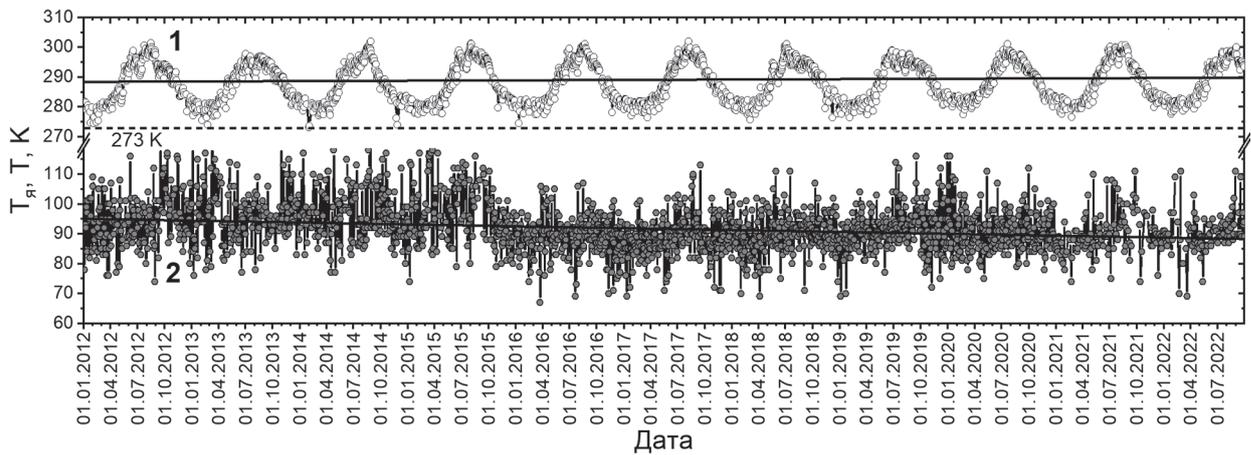
На *рис. 2* (см. с. 225–227) приведены графики многолетней сезонной динамики  $T_{\text{я}}(\text{JD})$  тестовых участков с 2012 по 2022 г. По оси абсцисс отложены значения юлианского дня  $\text{JD}_{2012}$ , отсчитываемого от начала периода наблюдения (01.01.2012). На всех графиках прямыми линиями обозначены многолетние зависимости  $T_{\text{я}}$  и  $T$ , позволяющие оценить происходящие изменения за период с 2012 по 2021 г.

Вариации  $T_{\text{я}}(\text{JD})$  в северной части Каспийского моря (см. *рис. 2а*) связаны с сезонным образованием ледового покрова на водной поверхности, с изменениями ледовитости, температуры и солёности поверхности моря (Гинзбург и др., 2004, 2021). Значения  $T_{\text{я}}$  изменяются от 90 К в периоды открытой воды до 270 К в периоды ледостава. Вид зависимости  $T_{\text{я}}(\text{JD})$  характерен для водоёмов с сезонным ледовым покровом, образующимся на поверхности воды. Цифрами 1–4 обозначены точки, соответствующие качественным изменениям характеристик микроволнового излучения подстилающей поверхности. Точка 1 ( $\text{JD}_1$ ) соответствует температуре начала замерзания солёной воды (изменения её агрегатного состояния в результате образования льда). Точка 2 ( $\text{JD}_2$ ) соответствует толщине льда, равной скин-слою. Дальнейшее увеличение толщины льда не ведёт к заметному изменению  $T_{\text{я}}$ , зависящей от температуры льда, наличия снежиц на поверхности льда во время оттепелей (Tikhonov et al., 2015). Точки 3 ( $\text{JD}_3$ ) и 4 ( $\text{JD}_4$ ) соответствуют началу и окончанию таяния солёного льда. В соответствии с этим специфической особенностью становится существование четырёх фаз состояния поверхности водоёма с разными радиоизлучательными характеристиками,

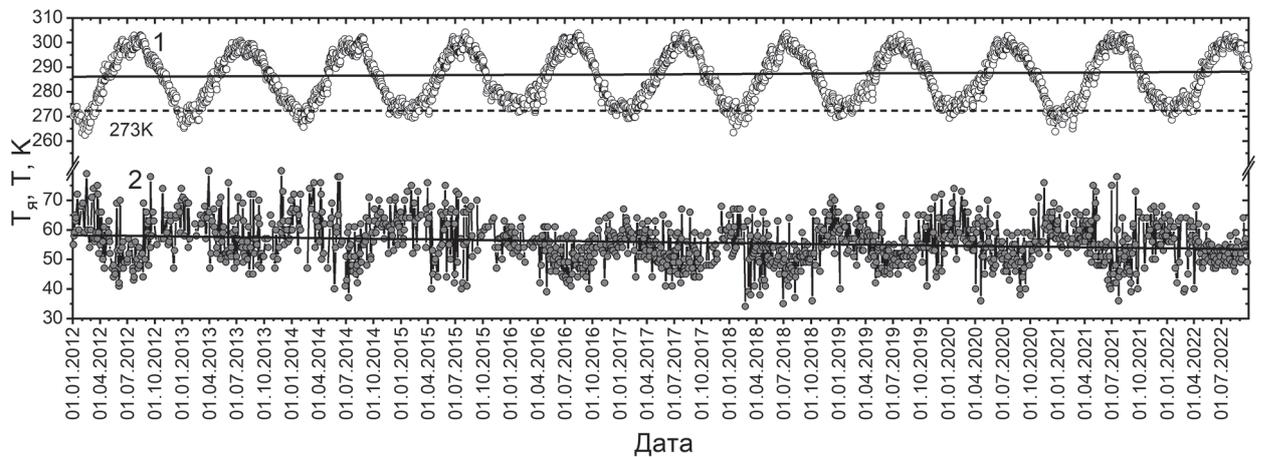
зависящими от температуры и солёности воды, толщины, температуры и солёности льда:  $(JD_1 - JD_2)$  — открытая вода;  $(JD_2 - JD_3)$  — образование ледяного покрова с толщиной льда  $d \leq L$  ( $L$  — скин-слой льда);  $(JD_3 - JD_4)$  — установившийся ледяной покров с толщиной  $d \geq L$ ;  $(JD_4 - JD_1)$  — таяние ледового покрова.



а



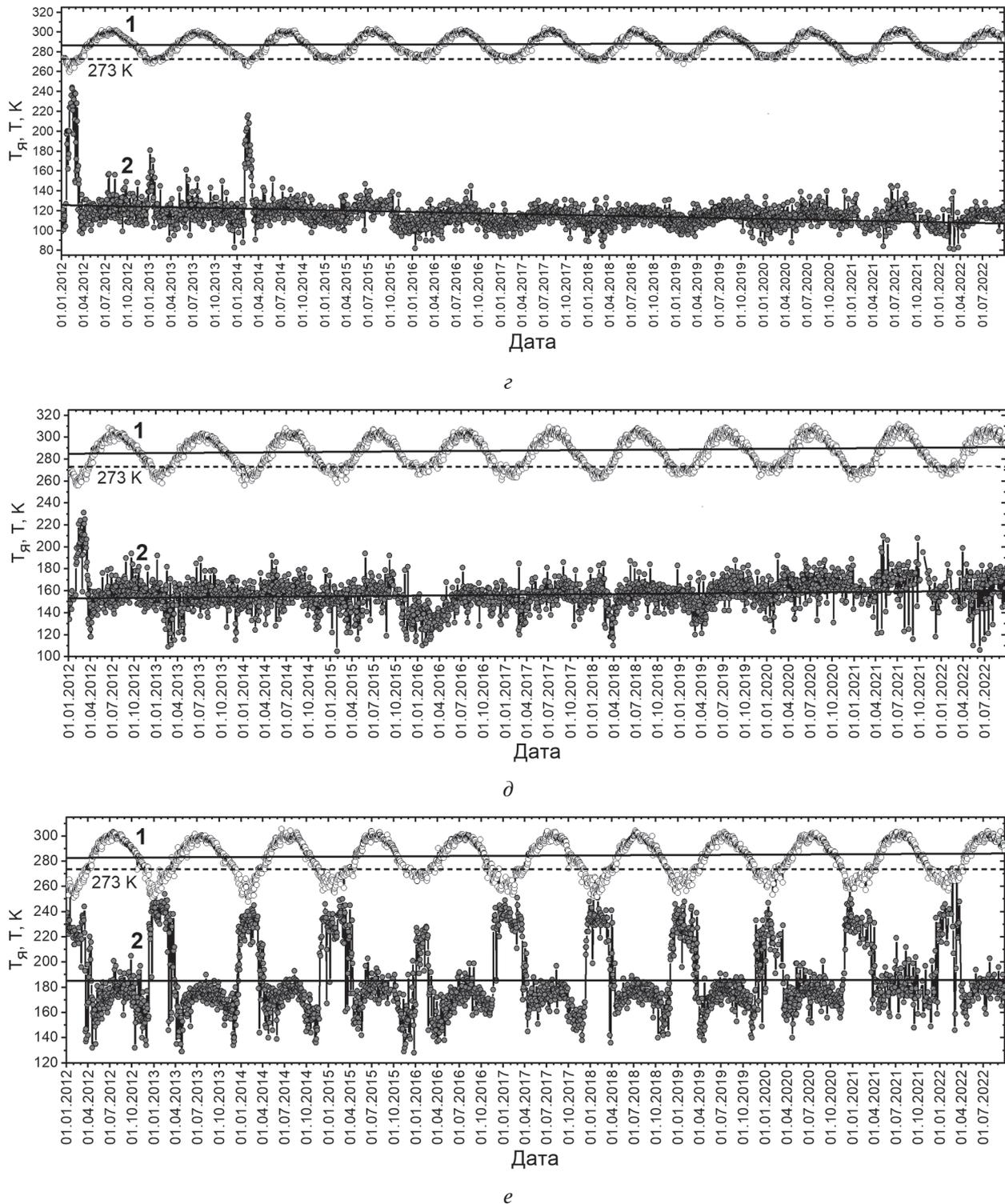
б



в

Рис. 2а–в. Сезонная динамика термодинамической (1) и радиояростной (2) температуры, измеренной на горизонтальной поляризации под углом зондирования  $42,5^\circ$  для северной (а) и южной (б) части Каспийского моря, зал. Кара-Богаз-Гол (в)

Для южной части Каспийского моря  $T_{\text{Я}}(\text{JD})$  (см. *рис. 2б*) имеет вид, характерный для незамерзающих в течение всего года минеральных водоёмов. В этом случае  $T_{\text{Я}}$  водной поверхности зависит от температуры и солёности воды (Olmedo et al., 2016; Talone et al., 2010), а также от морского волнения и образования пены на поверхности моря (Yin et al., 2012).



*Рис. 2г–е.* Сезонная динамика термодинамической (1) и радиояростной (2) температуры, измеренной на горизонтальной поляризации под углом зондирования  $42,5^\circ$  для зал. Кара-Богаз-Гол (*а*), Сарыкамышского оз. (*б*), западной (*в*) и северной (*г*) части Аральского моря

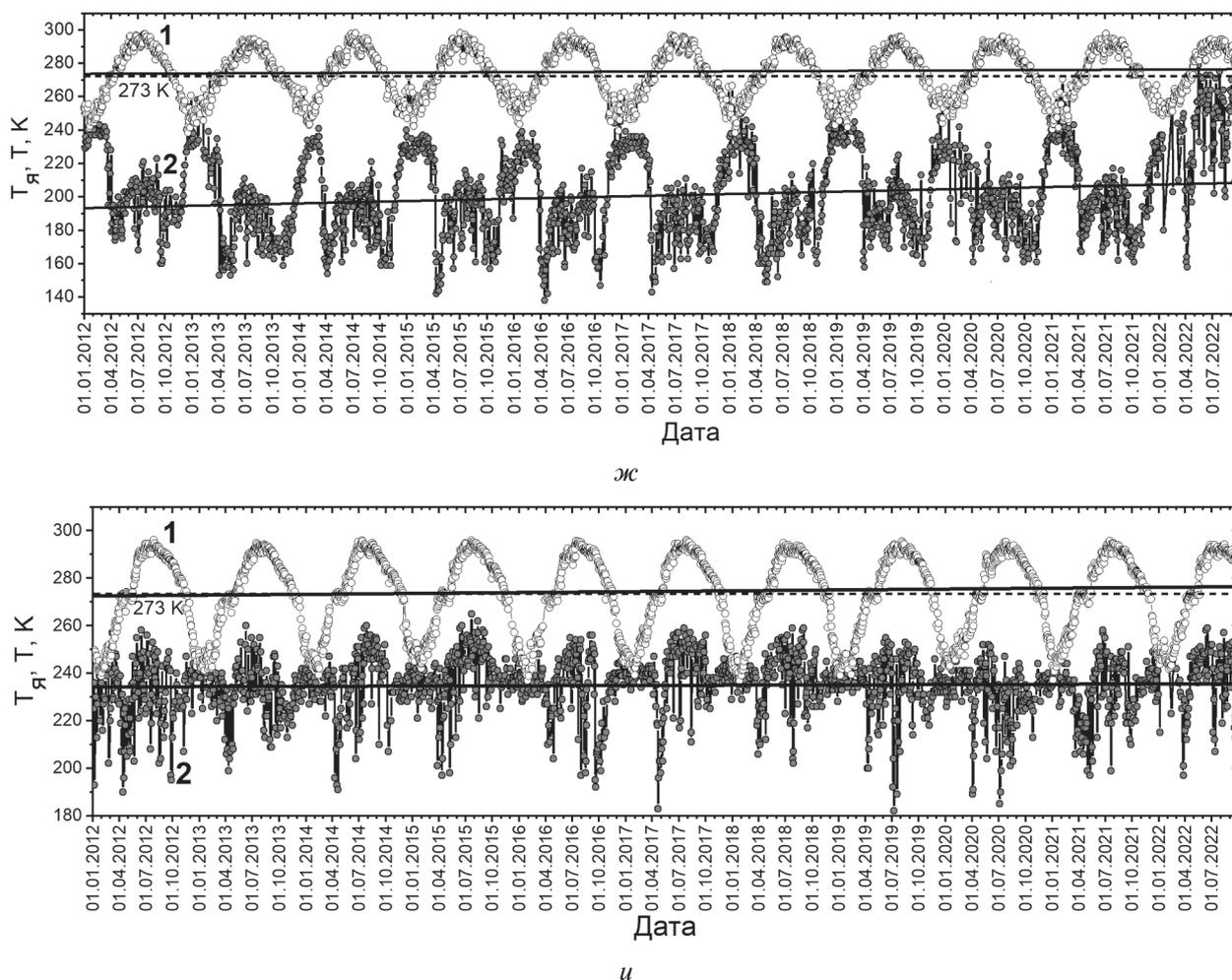


Рис. 2ж, з. Сезонная динамика термодинамической (1) и радиояростной (2) температуры, измененной на горизонтальной поляризации под углом зондирования  $42,5^\circ$  для Кулундинского оз. (ж), оз. Убсу-Нур (з) (объяснения в тексте)

На рис. 2в приведены зависимости  $T_{\text{я}}(\text{JD})$  для зал. Кара-Богаз-Гол, являющегося крупнейшим в мире месторождением мирабилита и характеризующегося высокой концентрацией растворённых в воде солей (от 270 до 380 ‰ в зависимости от сезона, температуры поверхности воды и уровня Каспийского моря, способствующих обмелению залива) (Гинзбург и др., 2022; Карпычев, 2007). Как видно из графиков,  $T_{\text{я}}(\text{JD})$  и  $T(\text{JD})$  находятся в противофазе (минимальные значения  $T_{\text{я}}$  соответствуют максимальным значениям  $T$  и наоборот). Подобное поведение  $T_{\text{я}}(\text{JD})$  может быть связано с особенностями растворения солей в воде и особенностями их выпадения в осадок.

Значительные гидрологические изменения происходят с бессточным горько-солёным Сарыкамышским оз., работающим с 1960-гг. как водоприёмник коллекторно-дренажных вод, формируемых в Хорезмской (Республика Узбекистан) и Дашхаузской (Республика Туркменистан) областях. За последние 35 лет Сарыкамышское оз. превратилось из небольших солончаков в крупнейший ирригационно-сбросовой водоём в бассейне Аральского моря. Минерализация воды в озере хлоридно-натриевая, солёность достигает 15–20 ‰. В последнее десятилетие исследования гидрологического состояния Сарыкамышского оз., а также других водных объектов Арало-Каспийского региона ведутся с использованием методов космического зондирования (Костяной и др., 2011).

Зависимость  $T_{\text{я}}(\text{JD})$  для Сарыкамышского оз. приведена на рис. 2г. В зимние периоды 2011/2012, 2012/2013, 2013/2014 гг. на водной поверхности озера образовывался ледовый покров, что подтверждается спутниковыми снимками в оптическом диапазоне ([Современные проблемы ДЗЗ из космоса, 19\(6\), 2022](https://world-</a></p>
</div>
<div data-bbox=)

view.earthdata.nasa.gov). С конца 2014 г. и по настоящее время ледовый покров не образовывался, что может быть связано с повышением массовой концентрации растворимых солей, приносимых коллекторно-дренажными водами.

Наиболее заметные гидрологические изменения претерпело Аральское море (АМ), подвергшееся с 1960-х гг. катастрофическому усыханию (Guo et al., 2018; Russell et al., 2018; Sharma et al., 2018; Shen et al., 2019; Singh, 2018; Sun et al., 2019). Из анализа зависимостей  $T_{\text{я}}(\text{JD})$  для западной (см. рис. 2д) и северной (см. рис. 2е) частей АМ, а также спутниковых снимков в оптическом диапазоне следует, что в западной части АМ ледовый покров в последний раз образовывался в 2012 г. Для северной части АМ характерно ежегодное образование ледового покрова, различающееся по продолжительности периодов открытой воды и льда.

Одним из крупнейших горько-солёных озёр на юге Западной Сибири и крупнейшим в Алтайском крае является Кулундинское оз., площадь которого в течение летнего сезона может изменяться на 25 % (в зависимости от погодных условий и водности года). Соответственно, с изменением площади озера также изменяется солёность воды (Галахов, 2003; Лебедева (Верба) и др., 2008). На рис. 2ж приведены вычисленные для Кулундинского оз.  $T_{\text{я}}(\text{JD})$  и  $T(\text{JD})$ . Динамика температуры водной поверхности озера определена по данным MODIS. Значения  $T$  усреднены по территории озера. Так как площадь озера меньше пикселя радиометра MIRAS, то производился перерасчёт значений  $T_{\text{я}}$  озера по формуле (1) для ячейки, формируемой только степью, и ячейки, формируемой Кулундинским оз. (35 %) и прилегающими к нему степными территориями (65 %).

На рис. 2и приведены зависимости  $T_{\text{я}}(\text{JD})$  и  $T(\text{JD})$  для крупнейшего в Монголии оз. Убсунур (данные  $T$ , измеренные на метеостанции WMO\_ID 44212 (англ. World Meteorological Organization Identifier — международный идентификатор Всемирной метеорологической организации) (Улангом: 49°59' с. ш., 92°05' в. д.; 939 м), взяты с метеорологического сайта rp5.ru (<https://rp5.ru>)). Гидрологические особенности озера зависят в значительной мере от вариаций солёности и условий ледостава (Степаненко и др., 2019). Обращают на себя внимание ежегодные резкие понижения  $T_{\text{я}}$ , которые могут быть связаны как с дождевыми осадками в зимне-весенний сезон, так и с более ранним вскрытием рек и затоплением ледового покрова озера речной водой. Возникновение многослойной структуры, образующейся в весенний период в результате поверхностного таяния льда и последующего замерзания растаявшей воды, сопровождается резкими кратковременными изменениями радиоизлучательных характеристик подстилающей поверхности. Это позволяет осуществить раннюю идентификацию начала таяния и получить дополнительную информацию о состоянии ледового покрова (Anderson et al., 1985).

Приведённые на рис. 2 зависимости  $T_{\text{я}}(\text{JD})$  и  $T(\text{JD})$  для исследованных озёр были аппроксимированы прямыми линиями, имеющими следующий вид:

$$T_{\text{я}} = A + B \cdot \text{JD}, \quad (2)$$

$$T = C + D \cdot \text{JD}, \quad (3)$$

где  $A, B, C, D$  — численные коэффициенты, приведённые в таблице.

Различие коэффициентов указывает на различие гидрологических изменений в разных регионах Северной Евразии. Из анализа спутниковых данных следует, что  $T$  возрастает для всех исследованных озёр с неодинаковой скоростью, что может быть связано с разницей в климатических условиях. В то же время величина  $T_{\text{я}}$  для разных минеральных озёр ведёт себя по-разному. Причинами понижения  $T_{\text{я}}$  для озёр, расположенных в южной части Северной Евразии, могут быть сокращение продолжительности холодного периода (за счёт повышения температуры), колебания уровня воды в озёрах, возрастание испарения и, соответственно, увеличение солёности воды, ведущее к уменьшению коэффициента излучения водной поверхности. Для минеральных озёр, расположенных в более высоких широтах, возрастание  $T_{\text{я}}$  может быть связано с сезонными процессами таяния снежного покрова в весенний период и уменьшением солёности воды, а также обмелением озёр в конце летнего сезона, образованием устойчивого ледового покрова.

Численные коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  в формулах (2), (3)

Объект	Сезонный ледяной покров	$A$	$B \times 10^{-4}$	$\sigma$	$C$	$D \times 10^{-4}$	$\sigma$
1	+	20276	-82,0	0,040	-2214	10,2	0,010
2	-	4319	-17,2	0,050	-585	3,6	
3		3038	-12,1	0,030	-1013	5,3	
4		11748	-47,3	0,090	-1348	6,6	
5		-4211	17,8	0,010	-3466	15	
6	+	-413	2,4	0,100	-1872	8,8	0,030
7	-9269	38,5	0,030	-1479	7,1		
8	-625	3,5	0,001	-2198	10,1	0,005	

Примечание:  $\sigma$  — стандартное отклонение.

### Заключение

Совместный анализ спутниковых данных SMOS, MODIS позволил выявить заметные сезонные вариации микроволнового излучения минеральных озёр. Показано, что закономерности многолетней сезонной динамики радиояркостной температуры минеральных озёр в Северной Евразии существенно различаются. Для минеральных озёр с образующимся на поверхности воды сезонным ледовым покровом на зависимости  $T_{\text{я}}(\text{JD})$  выделено четыре временных интервала, в каждом из которых радиояркие характеристики водной поверхности зависят от скорости образования или таяния льда, изменения температуры и минерализации воды.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22-17-20041, <https://rscf.ru/project/22-17-20041/>.

### Литература

1. *Галахов В. П.* Условия формирования поверхностного стока в бассейне Кулундинского озера // Изв. Алтайского гос. ун-та. 2003. № 3(29). С. 071–078.
2. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А.* Сезонная и межгодовая изменчивость температуры поверхности Каспийского моря // Океанология. 2004. Т. 44. № 5. С. 645–659.
3. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Серых И. В., Лебедев С. А.* Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980–2020) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 277–291. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291.
4. *Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А.* О динамике вод в заливе Кара-Богаз-Гол (спутниковая информация) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 265–279. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-265-279.
5. *Карпычев Ю. А.* Изменчивость осадконакопления залива Кара-Богаз-Гол в связи с колебаниями уровня моря в новокаспийское время // Океанология. 2007. Т. 47. № 6. С. 918–926.
6. *Костяной А. Г., Лебедев С. А., Лаврова О. Ю., Соловьев Д. М.* Спутниковый мониторинг вод Туркменистана // 9-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. 14–18 нояб. 2011, Москва. 2011. С. 271. <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=30&thesis=2898>.
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. *Степаненко В. М., Репина И. А., Ганбат Г., Даваа Г.* Моделирование ледового режима соленых озер // Изв. Российской акад. наук. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 1. С. 152–163. DOI: 10.31857/S0002-3515551152-163.
9. *Anderson M. R., Crane R. G., Barry R. G.* Characteristics of arctic ocean ice determined from SMMR data for 1979: Case studies in the seasonal sea ice zone // Advances in Space Research. 1985. V. 5. Iss. 6. P. 257–261. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(85\)90329-1](https://doi.org/10.1016/0273-1177(85)90329-1).

10. Gorji T., Sertel E., Tanik A. Monitoring soil salinity via remote sensing technology under data scarce conditions: A case study from Turkey // *Ecological Indicators*. 2017. V. 74. P. 384–391. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.11.043.
11. Guo H., Bao A., Liu T., Jiapaer G., Ndayisaba F., Jiang L., Kurban A., De Maeyer P. Spatial and temporal characteristics of droughts in Central Asia during 1966–2015 // *Science of the total environment*. 2018. V. 624. P. 1523–1538. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.120>.
12. Gutierrez A., Castro R., Vieira P. SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model. SO-DS-DME-L1OP-0009. No. 2.14. 2014. 80 p. [https://earth.esa.int/documents/10174/1854456/SMOS\\_L1c-Data-Processing-Models](https://earth.esa.int/documents/10174/1854456/SMOS_L1c-Data-Processing-Models).
13. Kamilli K.A., Ofner J., Krause T., Sattler T., Schmitt-Kopplin P., Eitenberger E., Friedbacher G., Lendl B., Lohninger H., Schöler H.F., Held A. How salt lakes affect atmospheric new particle formation: A case study in Western Australia // *Science of The Total Environment*. 2016. V. 573. P. 985–995. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.058>.
14. Moore J.N. Recent desiccation of Western Great Basin Saline Lakes: Lessons from Lake Abert, Oregon, USA // *Science of The Total Environment*. 2016. V. 554–555. P. 142–154. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.161>.
15. Njoku E.G., Kong J.A. Theory for passive microwave remote sensing of near surface soil moisture // *J. Geophysical Research*. 1977. V. 82. P. 3108–3118. <https://doi.org/10.1029/JB082i020p03108>.
16. Olmedo E., Martínez J., Umbert M., Hoareau N., Portabella M., Ballabrera-Poy J., Turiel A. Improving time and space resolution of SMOS salinity maps using multifractal fusion // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 180. P. 246–263. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.038>.
17. Panciera R., Walker J.P., Kalma J., Kim E. A proposed extension to the soil moisture and ocean salinity level 2 algorithm for mixed forest and moderate vegetation pixels // *Remote Sensing of Environment*. 2011. V. 115. Iss. 12. P. 3343–3354. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.017>.
18. Poursanidis D., Chrysoulakis N. Remote Sensing, natural hazards and the contribution of ESA Sentinels missions // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2017. V. 6. P. 25–38. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.02.001>.
19. Romanov A.N., Khvostov I.V., Sukovatova A. Yu. Seasonal variations of microwave radiation of saline soils in the Kulunda stepped on evidence derived from SMOS // *Progress in Electromagnetics Research Symp. — Spring (PIERS)*. 2017. P. 3025–3031. DOI: 10.1109/PIERS.2017.8262274.
20. Roy S.K., Rowlandson T.L., Berg A.A., Champagne C., Adams J.R. Impact of sub-pixel heterogeneity on modelled brightness temperature for an agricultural region // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2016. V. 45. P. 212–220. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2015.10.003>.
21. Rüdiger C., Walker J.P., Kerr Y., Kim E.J., Hacker J.M., Gurney R.J., Barrett D., Marshall J.L. Toward Vicarious Calibration of Microwave Remote-Sensing Satellites in Arid Environments // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2014. V. 52. Iss. 3. P. 1749–1760. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2254121.
22. Russell A., Ghalaieny M., Gazdiyeva B., Zhumabayeva S., Kurmanbayeva A., Akhmetov K.K., Mukanov Y., McCann M., Ali M., Tucker A., Vitolo C., Althonayan A. A Spatial Survey of Environmental Indicators for Kazakhstan: An Examination of Current Conditions and Future Needs // *Intern. J. Environmental Research*. 2018. V. 12. Iss. 5. P. 735–748. <https://doi.org/10.1007/s41742-018-0134-7>.
23. Sahr K., White D., Kimerling A.J. Geodesic Discrete Global Grid System // *Cartography and Geographic Information Science*. 2003. V. 30. Iss. 2. P. 121–134. <https://doi.org/10.1559/152304003100011090>.
24. Shao Y., Wang L., Wang G., Chai X., Gao Z., Zhang T., Gong H., Liu C. Lake Lop Nur evolution analysis based on radar polarimetric decomposition technology // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symp.* 2014. P. 2731–2733. DOI: 10.1109/IGARSS.2014.6947040.
25. Sharkov E.A. *Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: physical foundations*. Berlin; N.Y.; L.; Paris; Tokyo: Springer: PRAXIS, 2003. 28 p.
26. Sharma A., Huang H.P., Zavialov P., Khan V. Impact of Desiccation of Aral Sea on the Regional Climate of Central Asia Using WRF Model // *Pure and applied geophysics*. 2018. V. 175. Iss. 1. P. 465–478. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1675-y>.
27. Shen H., Abuduwaili J., Ma L. Remote sensing-based land surface change identification and prediction in the Aral Sea bed, Central Asia // *Intern. J. Environmental Science and Technology*. 2019. V. 16. Iss. 4. P. 2031–2046. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1801-0>.
28. Singh A., Behrangi A., Fisher J.B., Reager J.T. On the Desiccation of the South Aral Sea Observed from Spaceborne Missions // *Remote Sensing*. 2018. V. 10. Iss. 5. Art. No. 793. <https://doi.org/10.3390/rs10050793>.
29. Sun F., Ma R. Hydrologic chencles of Aral Sea: A reveal by the combination of radar altimeter data and optical images // *Annals of GIS*. 2019. V. 25. Iss. 3. P. 247–261. <https://doi.org/10.1080/19475683.2019.1626909>.
30. Talone M., Sabia R., Camps A., Vall-Ilossera M., Gabarro C., Font J. Sea surface salinity retrievals from HUT-2D L-band radiometric measurements // *Remote Sensing of Environment*. 2010. V. 114. Iss. 8. P. 1756–1764. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.03.006>.

31. Tikhonov V. V., Repina I. A., Raev M. D., Sharkov E. A., Ivanov V. V., Boyarskii D. A., Alexeeva T. A., Komarova N. Yu. A physical algorithm to measure sea ice concentration from passive microwave remote sensing data // *Advances in Space Research*. 2015. V. 56(8). P. 1578–1589. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.07.009>.
32. Ulaby F. T., Moor R. K., Fung A. K. *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*. In 3 v. Addison-Wesley Publ. Company, 1986. 1645 p.
33. Waiser M. J., Robarts R. D. Saline Inland Waters // *Encyclopedia of Inland Waters*. Elsevier, 2009. V. 2. P. 634–644.
34. Wang J., Guo N., Ma C. The dynamic variation characteristics of Gahai Lake area based on EOS-MODIS data // *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.* 2012. P. 768–771. DOI: 10.1109/IGARSS.2012.6351451.
35. Wigneron J.-P., Schwank M., Baeza E. L., Kerr Y., Novello N., Millan C., Moisy C., Richaume P., Mialon A., Al Bitar A., Cabot F., Lawrence H., Guyon D., Calvet J.-C., Grant J. P., Casal T., de Rosnay P., Saleh K., Mahmoodi A., Delwart S., Mecklenburg S. First evaluation of the simultaneous SMOS and ELBARA-II observations in the Mediterranean region // *Remote Sensing of Environment*. 2012. V. 124. P. 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.014>.
36. Yan L., Zheng M. Influence of climate change on saline lakes of the Tibet Plateau, 1973–2010 // *Geomorphology*. 2015. V. 246. P. 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.06.006>.
37. Yin X., Boutin J., Martin N., Spurgeon P. Optimization of L-Band Sea surface emissivity models deduced from SMOS Data // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2012. V. 50. Iss. 5. P. 1414–1426. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2184547.

## Analysis of hydrological changes in mineral lakes in Northern Eurasia based on SMOS satellite data

A. N. Romanov, I. V. Khvostov, I. V. Ryabinin, D. A. Romanov

*Institute of Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul 656038, Russia*  
*E-mails: romanov\_alt@mail.ru, nii@mail.ru, cgsienna@gmail.com*

The climatic changes taking place in Northern Eurasia, which have become especially aggravated in the past few decades, in combination with the anthropogenic impact on ecosystems, cause noticeable changes in the hydrological characteristics of mineral lakes. Based on the results of daily measurements of brightness temperature  $T_b$  from the SMOS (Soil Moisture and Ocean Solution) satellite, the long-term seasonal dynamics of hydrological changes in some large mineral lakes of Northern Eurasia (Caspian Sea, Kara-Bogaz-Gol Bay, Aral Sea, lakes Sarykamyskoe, Kulunda, Ubsu-Nur) from 2012 to 2022 was studied. The analysis of the seasonal and interannual dynamics of  $T_b$  and thermodynamic temperature of the underlying surface was performed on the basis of the SMOS L1C and MODIS MOD11A1 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) products, respectively. Four periods were identified with different behavior of the radiative characteristics of mineral lakes, associated with a decrease in temperature below the freezing point of salt water, the formation and melting of ice cover on the water surface, changes in the area of the water table, and salinity of water. In the northern Caspian Sea, the influence of the phenological phases of ice cover on the change in the microwave radiation of the underlying surface was noted. The features of microwave radiation of the western (deep water) and northern parts of the Aral Sea are studied. The seasonal dynamics of  $T_b$  is associated with the processes of formation of ice cover on the water surface. Judging by the changed seasonal dynamics of the  $T_b$ , the Sarykamysk Lake was transformed into a year-round ice-free lake. Peculiarities of the seasonal dynamics of  $T_b$  for Lake Ubsu-Nur are revealed, which can be associated with rainfall in the winter-spring season, as well as with the early opening of rivers and flooding of the ice cover of the lake with river water.

**Keywords:** salt lakes of Northern Eurasia, remote sensing, microwave range, radio brightness temperature, SMOS satellite

Accepted: 02.12.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-222-333

## References

1. Galakhov V. P., Conditions for the formation of surface runoff in the Kulunda lake basin, *News of the Altai State University*, 2003, No. 3(29), pp. 071–078 (in Russian).
2. Ginzburg A. I., Kostianoi A. G., Sheremet N. A., Seasonal and interannual variability of the surface temperature in the Caspian Sea, *Oceanology*, 2004, Vol. 44, No. 5, pp. 605–618.
3. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Serykh I. V., Lebedev S. A., Climatic changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea (1980–2020), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 5, pp. 277–291 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291.
4. Ginzburg A. I., Kostyanoy A. G., Sheremet N. A., On the dynamics of waters in the Kara-Bogaz-Gol Bay (satellite information), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 4, pp. 265–279 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-265-279.
5. Karpychev Yu. A., Variations in the sedimentation in Kara Bogaz Gol bay related to sea level fluctuations during the novocaspian time, *Oceanology*, 2007, Vol. 47, No. 6, pp. 857–864, DOI: 10.1134/S0001437007060100.
6. Kostyanoy A. G., Lebedev S. A., Lavrova O. Yu., Soloviev D. M., Solov'ev D. M., Satellite monitoring of the waters of Turkmenistan, *9-ya Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa" (9<sup>th</sup> All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space")*, 14–18 Nov. 2011, Moscow, 2011, p. 271 (in Russian), <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=30&thesis=2898>.
7. Lebedeva (Verba) M. P., Lopukhina O. V., Kalinina N. V., Specificity of the Chemical and Mineralogical Composition of Salts in Solonchak Playas and Lakes of the Kulunda Steppe, *Pochvovedenie*, 2008, No. 4, pp. 467–480 (in Russian).
8. Stepanenko V. M., Repina I. A., Ganbat G., Davaa G., Numerical simulation of ice cover of saline lakes, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, Vol. 55, No. 1, pp. 129–138, DOI: 10.1134/S0001433819010092.
9. Anderson M. R., Crane R. G., Barry R. G., Characteristics of arctic ocean ice determined from SMMR data for 1979: Case studies in the seasonal sea ice zone, *Advances in Space Research*, 1985, Vol. 5, Issue 6, pp. 257–261, [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(85\)90329-1](https://doi.org/10.1016/0273-1177(85)90329-1).
10. Gorji T., Sertel E., Tanik A., Monitoring soil salinity via remote sensing technology under data scarce conditions: A case study from Turkey, *Ecological Indicators*, 2017, Vol. 74, pp. 384–391, DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.11.043.
11. Guo H., Bao A., Liu T., Jiapaer G., Ndayisaba F., Jiang L., Kurban A., De Maeyer P., Spatial and temporal characteristics of droughts in Central Asia during 1966–2015, *Science of the Total Environment*, 2018, Vol. 624, pp. 1523–1538, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.120>.
12. Gutierrez A., Castro R., Vieira P., *SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model, SO-DS-DME-LIOP-0009*, 2014, No. 2.14, 80 p., [https://earth.esa.int/documents/10174/1854456/SMOS\\_L1c-Data-Processing-Models](https://earth.esa.int/documents/10174/1854456/SMOS_L1c-Data-Processing-Models).
13. Kamilli K. A., Ofner J., Krause T., Sattler T., Schmitt-Kopplin P., Eitenberger E., Friedbacher G., Lendl B., Lohninger H., Schöler H. F., Held A., How salt lakes affect atmospheric new particle formation: A case study in Western Australia, *Science of the Total Environment*, 2016, Vol. 573, pp. 985–995, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.058>.
14. Moore J. N., Recent desiccation of Western Great Basin Saline Lakes: Lessons from Lake Abert, Oregon, USA, *Science of The Total Environment*, 2016, Vol. 554–555, pp. 142–154, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.161>.
15. Njoku E. G., Kong J. A., Theory for passive microwave remote sensing of near surface soil moisture, *J. Geophysical Research*, 1977, Vol. 82, pp. 3108–3118, <https://doi.org/10.1029/JB082i020p03108>.
16. Olmedo E., Martínez J., Umberto M., Hoareau N., Portabella M., Ballabrera-Poy J., Turiel A., Improving time and space resolution of SMOS salinity maps using multifractal fusion, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 180, pp. 246–263, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.038>.
17. Panciera R., Walker J. P., Kalma J., Kim E., A proposed extension to the soil moisture and ocean salinity level 2 algorithm for mixed forest and moderate vegetation pixels, *Remote Sensing of Environment*, 2011, Vol. 115, Issue 12, pp. 3343–3354, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.017>.
18. Poursanidis D., Chrysoulakis N., Remote Sensing, natural hazards and the contribution of ESA Sentinels missions, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2017, Vol. 6, pp. 25–38, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.02.001>.
19. Romanov A. N., Khvostov I. V., Sukovatova A. Yu., Seasonal variations of microwave radiation of saline soils in the Kulunda stepped on evidence derived from SMOS, *Progress in Electromagnetics Research Symp. — Spring (PIERS)*, 2017, pp. 3025–3031, DOI: 10.1109/PIERS.2017.8262274.
20. Roy S. K., Rowlandson T. L., Berg A. A., Champagne C., Adams J. R., Impact of sub-pixel heterogeneity on modelled brightness temperature for an agricultural region, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, Vol. 45, pp. 212–220, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2015.10.003>.

21. Rüdiger C., Walker J. P., Kerr Y., Kim E. J., Hacker J. M., Gurney R. J., Barrett D., Marshall J. L., Toward Vicarious Calibration of Microwave Remote-Sensing Satellites in Arid Environments, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2014, Vol. 52, Issue 3, pp. 1749–1760, DOI: 10.1109/TGRS.2013.2254121.
22. Russell A., Ghalaieny M., Gazdiyeva B., Zhumabayeva S., Kurmanbayeva A., Akhmetov K. K., Mukanov Y., McCann M., Ali M., Tucker A., Vitolo C., Althonayan A., A Spatial Survey of Environmental Indicators for Kazakhstan: An Examination of Current Conditions and Future Needs, *Intern. J. Environmental Research*, 2018, Vol. 12, Issue 5, pp. 735–748, <https://doi.org/10.1007/s41742-018-0134-7>.
23. Sahr K., White D., Kimerling A. J., Geodesic Discrete Global Grid System, *Cartography and Geographic Information Science*, 2003, Vol. 30, Issue 2, pp. 121–134, <https://doi.org/10.1559/152304003100011090>.
24. Shao Y., Wang L., Wang G., Chai X., Gao Z., Zhang T., Gong H., Liu C., Lake Lop Nur evolution analysis based on radar polarimetric decomposition technology, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symp.*, 2014, pp. 2731–2733, DOI: 10.1109/IGARSS.2014.6947040.
25. Sharkov E. A., *Passive Microwave Remote Sensing of the Earth: physical foundations*, Berlin; New York; London; Paris; Tokyo: Springer PRAXIS, 2003, 28 p.
26. Sharma A., Huang H. P., Zavalov P., Khan V., Impact of Desiccation of Aral Sea on the Regional Climate of Central Asia Using WRF Model, *Pure and Applied Geophysics*, 2018, Vol. 175, Issue 1, pp. 465–478, <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1675-y>.
27. Shen H., Abuduwaili J., Ma L., Remote sensing-based land surface change identification and prediction in the Aral Sea bed, Central Asia, *Intern. J. Environmental Science and Technology*, 2019, Vol. 16, Issue 4, pp. 2031–2046, <https://doi.org/10.1007/s13762-018-1801-0>.
28. Singh A., Behrangi A., Fisher J. B., Reager J. T., On the Desiccation of the South Aral Sea Observed from Spaceborne Missions, *Remote Sensing*, 2018, Vol. 10, Issue 5, Art. No. 793, <https://doi.org/10.3390/rs10050793>.
29. Sun F., Ma R., Hydrologic chencles of Aral Sea: A reveal by the combination of radar altimeter data and optical images, *Annals of GIS*, 2019, Vol. 25, Issue 3, pp. 247–261, <https://doi.org/10.1080/19475683.2019.1626909>.
30. Talone M., Sabia R., Camps A., Vall-llossera M., Gabarró C., Font J., Sea surface salinity retrievals from HUT-2D L-band radiometric measurements, *Remote Sensing of Environment*, 2010, Vol. 114, Issue 8, pp. 1756–1764, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.03.006>.
31. Tikhonov V. V., Repina I. A., Raev M. D., Sharkov E. A., Ivanov V. V., Boyarskii D. A., Alexeeva T. A., Komarova N. Yu., A physical algorithm to measure sea ice concentration from passive microwave remote sensing data, *Advances in Space Research*, 2015, Vol. 56(8), pp. 1578–1589, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.07.009>.
32. Ulaby F. T., Moor R. K., Fung A. K., *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*, In 3 vol., Addison-Wesley Publ. Company, 1986, 1645 p.
33. Waiser M. J., Roberts R. D., Saline Inland Waters, In: *Encyclopedia of Inland Waters*, Elsevier, 2009, Vol. 2, pp. 634–644.
34. Wang J., Guo N., Ma C., The dynamic variation characteristics of Gahai Lake area based on EOS-MODIS data, *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, 2012, pp. 768–771, DOI: 10.1109/IGARSS.2012.6351451.
35. Wigneron J.-P., Schwank M., Baeza E. L., Kerr Y., Novello N., Millan C., Moisy C., Richaume P., Mialon A., Al Bitar A., Cabot F., Lawrence H., Guyon D., Calvet J.-C., Grant J. P., Casal T., de Rosnay P., Saleh K., Mahmoodi A., Delwart S., Mecklenburg S., First evaluation of the simultaneous SMOS and ELBARA-II observations in the Mediterranean region, *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 124, pp. 26–37, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.014>.
36. Yan L., Zheng M., Influence of climate change on saline lakes of the Tibet Plateau, 1973–2010, *Geomorphology*, 2015, Vol. 246, pp. 68–78, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.06.006>.
37. Yin X., Boutin J., Martin N., Spurgeon P., Optimization of L-Band Sea surface emissivity models deduced from SMOS Data, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, Issue 5, pp. 1414–1426, DOI: 10.1109/TGRS.2012.2184547.