

К разработке дистанционного микроволнового индекса гидрологической засухи (на примере сезонного усыхания гипергалинного озера)

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

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

Приведены результаты 10-летних исследований сезонных вариаций радиояркостной температуры гипергалинного Кулундинского оз., расположенного на территории Кулундинской равнины (юг Западной Сибири), характеризующейся засушливым климатом с малым годовым количеством атмосферных осадков. На их основе предложен новый подход к разработке дистанционного микроволнового индекса гидрологической засухи. Анализ сезонной динамики радиояркостной ($T_{\text{я}}$) и термодинамической температуры водной поверхности озера выполнен с использованием продуктов L1C SMOS (*англ.* Soil Moisture and Ocean Salinity) и MOD11A1 MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Продукт L1C содержит значения $T_{\text{я}}$, полученные для угла зондирования $42,5^\circ$ на горизонтальной и вертикальной поляризации, и привязан к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4H9 (*англ.* Discrete Global Grid Icosahedral Snyder Equal Area). По результатам лабораторных измерений диэлектрических характеристик воды из Кулундинского оз. и донного грунта установлены экспериментальные зависимости коэффициентов излучения водной поверхности и осушенного дна от температуры. С использованием спутниковых данных оптического диапазона изучены закономерности сезонного усыхания озера, выявлены периодические циклы усыхания. Разработанный алгоритм может быть использован для территории с несколькими усыхающими озёрами, попадающими в пиксель спутникового радиометра.

Ключевые слова: солёность, минеральное озеро, коэффициент излучения, радиояркостная температура, спутник SMOS, Западная Сибирь

Одобрена к печати: 31.10.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-222-233

Введение

Гидрологическая засуха (ГЗ) представляет собой опасное природное явление, способное привести к деградации водоёмов суши, в том числе к повышению солёности, ухудшению качества воды, изменению ихтиофауны, зоо- и фитобентоса. В периоды ГЗ происходит снижение уровня воды в реках, усыхание озёр, уменьшение запасов грунтовых вод. В качестве классификационных признаков засух используются продолжительность экстремальных значений температуры и влажности природных сред (воздух, почва), уровень и расход воды в водных объектах.

К основным факторам, способствующим развитию засух, относятся климатические особенности региона, характеристики водосборного бассейна, а также деятельность человека (Keller et al., 2023; Zhang X. et al., 2022). Подробный анализ ГЗ в мире с 1980 по 2008 г. приведён в работе (Добровольский, 2015). В исследованиях (Владимиров, 2012; Владимиров, Малышева, 2012) систематизированы физико-географические и антропогенные факторы, создающие ГЗ.

Для анализа состояния водоёма в условиях засухи используются: гидрологический индекс засухи Палмера, модифицированный для учёта продолжительной засухи, влияющей на речной сток и подземные воды; стандартизированный индекс запаса водоёма, изменяющийся в диапазоне от -3 (экстремально сухо) до $+3$ (экстремально влажно); стандартизированный индекс речного стока, определяемый для заданного периода времени как разница в речном стоке от среднего до стандартного отклонения; стандартизированный индекс стока (Рахмуни и др., 2022). При дистанционном мониторинге ГЗ также используются различные дистанци-

онные индексы засухи, в том числе стандартизированный индекс осадков и эвапотранспирации, позволяющий обнаруживать явления засушливости и увлажнения; мелиоративный индекс засушливости, разработанный для определения интенсивности и продолжительности засух; индекс запаса поверхностной влаги (Svoboda, Fuchs, 2016).

Прогнозирование опасных гидрологических явлений эффективно с применением спутниковых снимков MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Ниязов, Калашникова, 2018). Дистанционные исследования гидрологических процессов включают оценку состояния поверхностных вод, водно-болотных угодий, использование воды в экосистемах, изменение облачности, водяного пара, осадков, испарения, транспирации, появление снега (Schaepman, 2007; Su et al., 2011). Для дистанционного выявления признаков ГЗ предложен алгоритм сегментирования водных объектов на спутниковых снимках Landsat, использующий свёрточную нейронную сеть, которая позволяет отличать воду от земли, снега, льда, облаков и теней (Isikdogan et al., 2017). В статьях (Lai et al., 2019; Sur et al., 2020) описан новый подход к дистанционному мониторингу гидрологической засухи, основанный на использовании долгосрочных спутниковых данных об осадках и стандартизированного индекса речного стока.

В работе (Zhang Q. et al., 2022) для оценки ГЗ разработаны дистанционные интегрированные индексы засухи (множественный индекс засухи, интегрированный индекс множественной засухи на основе индекса условий осадков, индекса температурных условий, индекса состояния растительности и индекса состояния влажности почвы). Установлена корреляция индекса засухи, разработанного с использованием спутниковых данных AMSR-E (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS), с влажностью почвы и речным стоком. В публикациях (De Natale et al., 2023; Zhang et al., 2017) показано, что различные индексы имеют разные преимущества в разных климатических условиях.

В засушливых и полузасушливых регионах в периоды ГЗ одной из проблем становится снижение уровня воды (УВ) в крупных озёрах. В работе (Foroumandi et al., 2022) исследованы причины снижения УВ бессточного солёного оз. Урмия (площадь 5200–6000 км², средняя глубина 5 м). Для оценки интенсивности, повторяемости и пространственно-временного распределения ГЗ в бассейне озера использовались аномалии нормализованного разностного вегетационного индекса (*англ.* Normalized difference vegetation index — NDVI), месячные значения влажности почвы, эвапотранспирации, временные ряды температуры подстилающей поверхности и осадков. Основной причиной ГЗ в бассейне озера являются температурные аномалии и антропогенное воздействие.

С использованием спутниковых данных из нескольких источников в районе крупнейшего в Китае пресноводного оз. Поянху оценены масштабы ГЗ за 12-летний период. Причиной ГЗ было очень малое количество осадков (Feng et al., 2012). С использованием индекса водного коэффициента (*англ.* Water Ratio Index — WRI) и нормализованного разностного индекса воды (*англ.* Normalized Difference Water Index — NDWI) оценены сезонные колебания УВ в искусственном озере в Приштине (Косово) (Naxhismajli et al., 2022). На основе индекса поверхностной влажности (*англ.* AMSR Surface Wetness Index — ASWI) проанализированы пространственно-временные характеристики засух в Центральной Азии с 2002 по 2018 г. (Yang et al., 2023).

В настоящей работе приведены результаты 10-летних исследований сезонных вариаций радиояростной температуры гипергалинного Кулундинского оз., расположенного на территории Кулундинской равнины (юг Западной Сибири), характеризующейся засушливым климатом с малым годовым количеством атмосферных осадков. На их основе предложен новый подход к разработке дистанционного микроволнового индекса гидрологической засухи.

Методика исследований

Объект исследования — акватория Кулундинского оз. и окружающая его степь, попадающие в пиксель спутника SMOS (*англ.* Soil Moisture and Ocean Salinity) (*рис. 1*, см. с. 224).

Кулундинское оз. является одним из крупнейших минеральных озёр Российской Федерации. Основным источником питания озера выступают пресноводные реки и ручьи, подземные воды и снежный покров. В течение внутривековых циклов колебаний водности и ежегодного усыхания площадь водной поверхности озера может изменяться от 728 до 615 км². Озеро мелководное, его средняя глубина составляет 2,5–3,0 м, максимальная глубина — 4 м, берега пологие. При абсолютной высоте 99,7 м над уровнем моря площадь озера — около 700 км², а объём воды равен 2,1 км³. По химическому составу вода из озера относится к сульфатно-хлоридным рапам (Догановский и др., 2004; Лебедева и др., 2008).

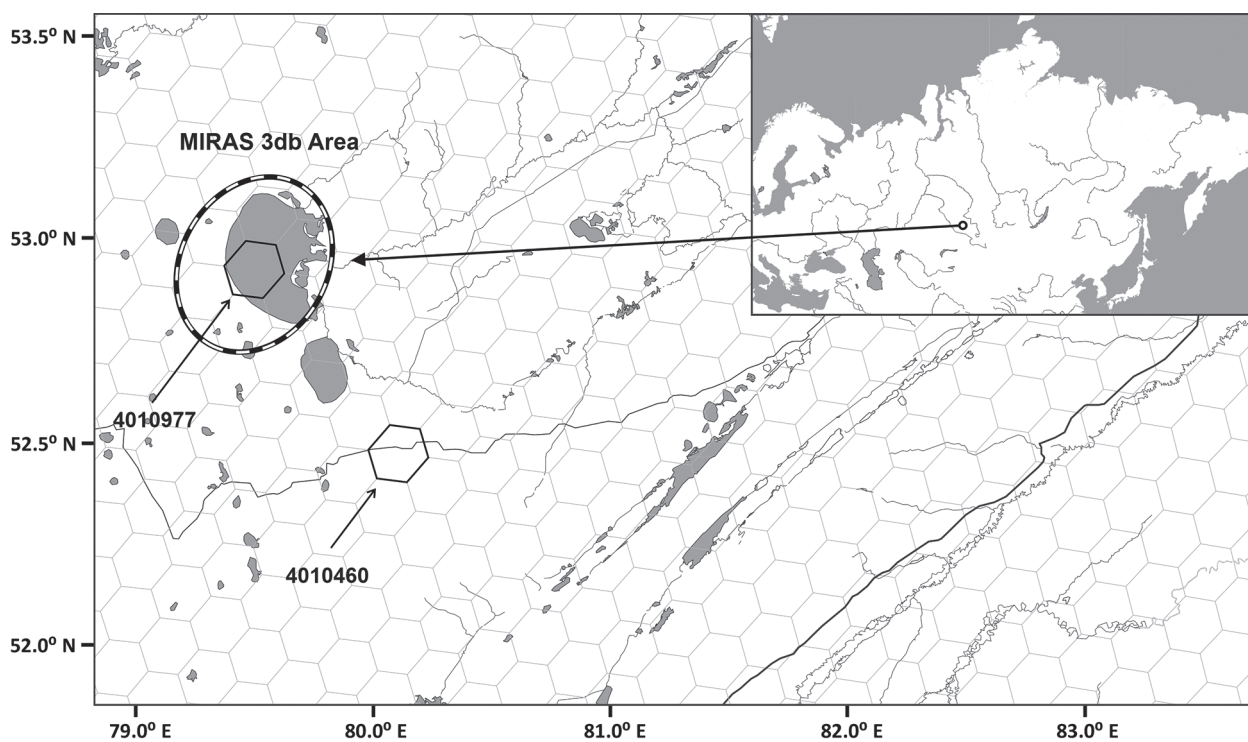


Рис. 1. Карта-схема исследуемой территории с геодезическими ячейками

Прилегающая к озеру территория представляет собой степь, свободную от древесной растительности. Суммарная площадь лесов, включая защитные лесополосы, составляет менее 0,01 %. Ландшафты, попадающие в пиксель спутника SMOS, представлены прилегающей к озеру степью, водной поверхностью озера и осушенными участками, образовавшимися в результате усыхания озера. Площадь обнажившегося дна озера различается в разные периоды летнего сезона. Площади участков оценивались с погрешностью не более 3 % путём маскирования спутниковых снимков оптического диапазона.

Для определения радиояркостной температуры ($T_{я}$) подстилающей поверхности использовался продукт L1C SMOS (Gutierrez et al., 2017). Продукт содержит значения $T_{я}$, полученные для угла зондирования 42,5° на горизонтальной и вертикальной поляризации. Продукт L1C привязан к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4H9 (англ. Discrete Global Grid Icosahedral Snyder Equal Area) (Sahr et al., 2003). Линейный размер ячейки составляет 16 км, площадь равна 195 км². Продольная и поперечная разрешающая способность для угла зондирования 42,5° составляет 64 и 35 км соответственно.

В случае пространственно-неоднородной подстилающей поверхности в диаграммы направленности принимающих антенн попадают объекты с разной излучательной способностью. $T_{я}$ пикселя SMOS формируется водной поверхностью Кулундинского оз., максимальная площадь которого составляет в зависимости от времени года 35–44 % от площади зондируемого участка, и прилегающей степью (56–65 %). $T_{я}$ может быть рассчитано по формуле:

$$T_{\text{я}} S = T_{\text{я}}^{\text{C}} S_{\text{C}} + T_{\text{я}}^{\text{O}} S_{\text{O}}^{\text{max}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{я}}$, $T_{\text{я}}^{\text{C}}$, — радиояркостная температура пикселя, включающего степь и озеро (ячейка № 4010977), и пикселя, включающего только степь (№ 4010460); $T_{\text{я}}^{\text{O}}$ — радиояркостная температура озера; S_{C} , $S_{\text{O}}^{\text{max}}$ — площадь степи и озера; $S = S_{\text{C}} + S_{\text{O}}^{\text{max}}$ — суммарная площадь пикселя. Преобразуем выражение (1) к следующему виду:

$$T_{\text{я}}^{\text{O}} = T_{\text{я}}^{\text{C}} + (T_{\text{я}} - T_{\text{я}}^{\text{C}}) \frac{S}{S_{\text{O}}^{\text{max}}}. \quad (2)$$

В процессе ГЗ происходит усыхание озера, в результате чего первоначальная площадь озера ($S_{\text{O}}^{\text{max}}$) уменьшается до S_{O} и на месте высохшего озера появляются участки осушенного дна общей площадью $S_{\text{Д}}$. Для озера с осушенными участками дна запишем выражение:

$$T_{\text{я}}^{\text{O}} S_{\text{O}}^{\text{max}} = T_{\text{я}}^{\text{B}} S_{\text{O}} + T_{\text{я}}^{\text{Д}} S_{\text{Д}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{я}}^{\text{B}}$, $T_{\text{я}}^{\text{Д}}$ — радиояркостная температура водной поверхности и осушенного дна.

Учитывая, что $S_{\text{O}}^{\text{max}} = S_{\text{O}} + S_{\text{Д}}$, преобразуем выражение (3) к виду:

$$(T_{\text{я}}^{\text{O}} - T_{\text{я}}^{\text{B}}) S_{\text{O}}^{\text{max}} = (T_{\text{я}}^{\text{Д}} - T_{\text{я}}^{\text{B}}) S_{\text{Д}}. \quad (4)$$

Используя полученное соотношение (4), введём дистанционный микроволновый индекс ГЗ (усыхания озера) G как отношение площади осушенного дна к первоначальной площади озера:

$$G = \frac{S_{\text{Д}}}{S_{\text{O}}^{\text{max}}} = \frac{T_{\text{я}}^{\text{O}} - T_{\text{я}}^{\text{B}}}{T_{\text{я}}^{\text{Д}} - T_{\text{я}}^{\text{B}}}. \quad (5)$$

Результаты исследований

Введённый дистанционный микроволновый индекс гидрологической засухи G может быть определён по спутниковым изображениям в оптическом диапазоне (Sentinel-2, уровень L2a NDWI), однако в этом случае сильно увлажнённый грунт может восприниматься как водная поверхность, что приведёт к значительному возрастанию погрешности. В то же время в микроволновом диапазоне диэлектрические и радиоизлучательные характеристики солёной воды и влажного грунта заметно различаются.

На *рис. 2* (см. с. 226) приведены значения площади озера S_{O} , определённые по спутниковым изображениям в оптическом диапазоне. Видно, что сезонное поведение S_{O} в разные годы различно. Так, например, с 2013 по 2015 и с 2019 по 2021 гг. S_{O} к концу летнего сезона уменьшается. Это может быть связано с обводнением в весенний период участков, высохших в предыдущем летнем сезоне, и малым количеством осадков в летний и осенний периоды. В период с 2017 по 2018 г. наблюдается обратное поведение сезонной динамики S_{O} , связанное с тем, что S_{O} к концу тёплого сезона увеличивается. Выявленная цикличность (2–4 года) может быть связана с неравномерным распределением осадков в течение года, малым количеством снега, накопленного в зимний период, и увеличением жидких осадков в осенний период.

Определение термодинамической температуры осушенного дна озера ($T_{\text{Д}}$) по данным MODIS MxD11A1 затруднено недостатком высоким разрешением данных (1000 м) по сравнению с обычными размерами участков. Однако в годы, когда уровень воды значительно опускается, открываются участки дна достаточной площади, чтобы считать, что соответствующие измерения MODIS характеризуют именно этот тип подстилающей поверхности. Для примера на *рис. 3* (см. с. 226) приведена динамика термодинамической температуры (T) в утренние и вечерние часы за период с 2012 по 2023 г. в трёх точках в районе оз. Кулундинское (JD — юлианский день, отсчитываемый от 01.01.2012).

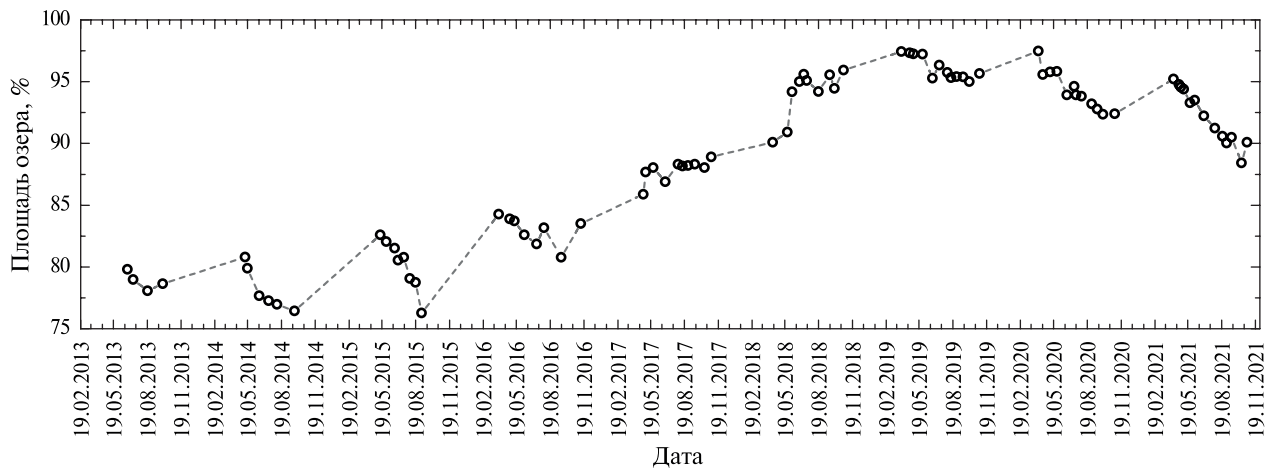


Рис. 2. Площадь водной поверхности Кулундинского оз., определённая по данным спутника Sentinel-2

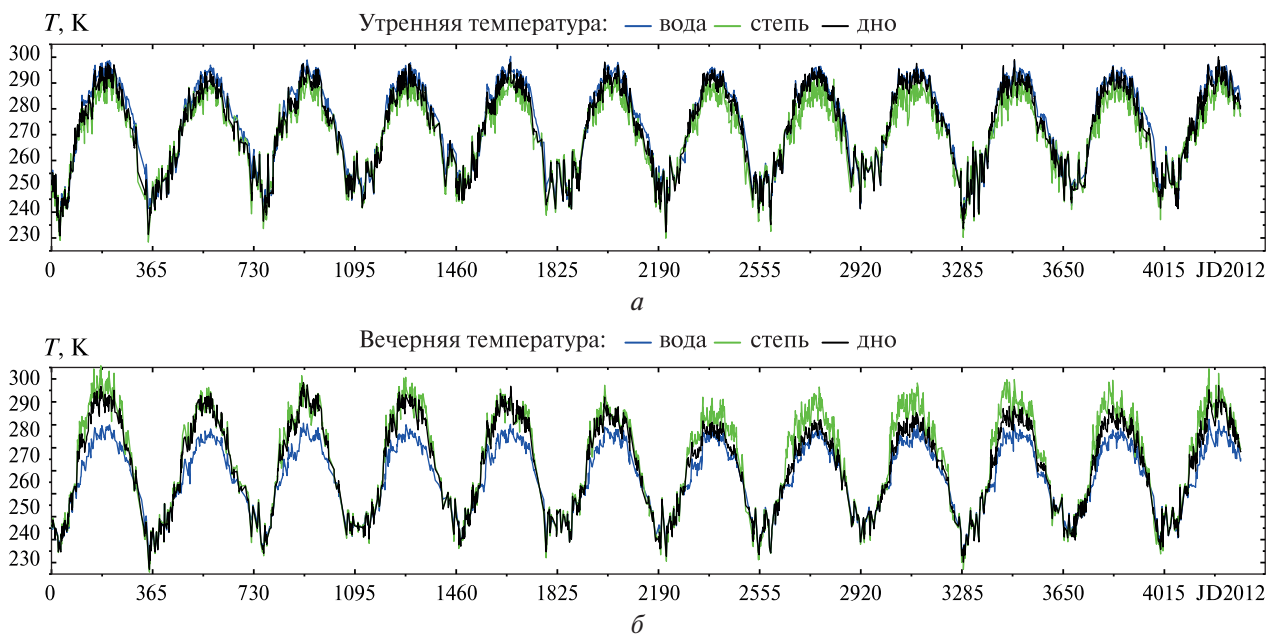


Рис. 3. Динамика утренних (а) и вечерних (б) (по UTC — англ. Coordinated Universal Time, всемирное координированное время) значений T_C , T_B , T_D

Степь: T_C — температура участка степи, удалённого от границы водной поверхности и суши более чем на 5 км в течение всего периода наблюдений.

Водная поверхность: T_B — температура водной поверхности, удалённой от границы водной поверхности и суши более чем на 5 км в течение всего периода наблюдений.

Осушенное дно: T_D — температура участка осушенного дна озера площадью более 2 км², который с 2012 по 2016 г. (первые пять лет наблюдений) не покрывался водой в течение всего сезона, при этом оставаясь удалённым от границы водной поверхности и суши на расстояние более 1 км. С 2017 г., вследствие увеличения уровня воды в озере, этот участок частично или полностью затопливался.

В летний период суточные колебания T_C достигают 25 К, а T_B не превышают 3–5 К. Суточные колебания T_D , наблюдавшиеся в период с 2012 по 2016 г., весьма схожи по размаху с T_C . Абсолютные значения T_D также ближе к значениям T_C (особенно в вечернее время), чем к значениям T_B . Однако совпадения T_C и T_D не достигается.

При оценке линейной корреляционной связи между T_D и T_B выяснилось, что абсолютные значения T_D стабильнее всего на разных временных интервалах и коррелируют со значе-

ниями T_B . При этом утренние и вечерние измерения следует рассматривать по отдельности. На рис. 4 представлены измерения T_D с мая по октябрь в 2012–2016 гг.

$$T_D(T_B) = \begin{cases} 1,4044T_B - 105,7, & \text{вечер, } R = 0,95, T_B = 273...303 \text{ К,} \\ 1,0692T_B - 23,8, & \text{утро, } R = 0,95, T_B = 273...303 \text{ К.} \end{cases}$$

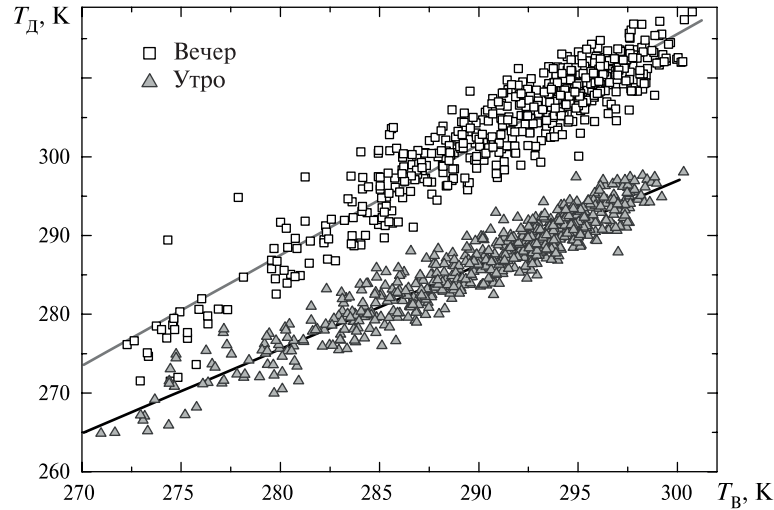


Рис. 4. Линейная зависимость $T_D(T_B)$

На первом этапе оценивали излучение всего объекта (водная поверхность + периодически оголяющееся дно). Для этого из сигнала ячейки № 4010977, содержащей объект и степь, исключали вклад степи (рис. 5):

$$T_{\text{я}}^{\text{O}} = T_{\text{я}}^{4010460} + \left(T_{\text{я}}^{4010977} - T_{\text{я}}^{4010460} \right) \frac{S_{\text{MIRAS}}}{S_{\text{max}}^{\text{O}}}, \quad S_{\text{MIRAS}} = 2040 \text{ км}^2, \quad S_{\text{O}}^{\text{max}} = 720 \text{ км}^2.$$

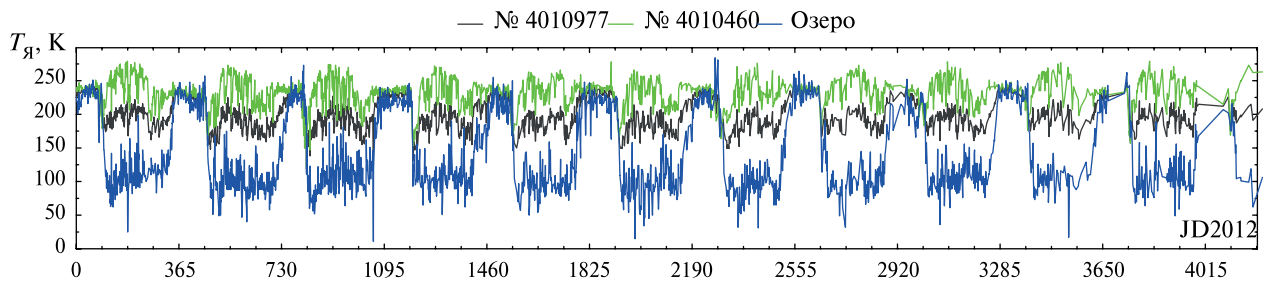


Рис. 5. Динамика $T_{\text{я}}(\text{JD})$ для ячеек SMOS

Исходя из модельных представлений об излучении водной поверхности и осушенного дна, результатов измерений диэлектрических характеристик воды и донных отложений, дистанционных данных T_B , T_D , определяли долю площади осушенного дна по отношению к максимальной площади озера по формуле (5), в которой $T_{\text{я}}^{\text{B}}$, $T_{\text{я}}^{\text{D}}$ рассчитывали по формулам (Романов, Хвостов, 2017):

$$T_{\text{я}}^{\text{B}} = \chi_{\text{H}}^{\text{B}} T_B, \quad T_B = 273 - 303 \text{ К,} \quad T_{\text{я}}^{\text{D}} = \chi_{\text{H}}^{\text{D}} T_D, \quad T_D = 273 - 303 \text{ К,}$$

$$\chi_{\text{H}}^{\text{B}}(T) = 0,527 - 1,24 \cdot 10^{-3} T, \quad \sigma = 0,004, \quad (6)$$

$$\chi_{\text{H}}^{\text{D}}(T) = 1,45162 - 0,0033T, \quad \sigma = 0,003, \quad (7)$$

где χ_H^B , χ_H^D — коэффициенты излучения воды и донного грунта; σ — среднеквадратическая погрешность.

Лабораторные измерения диэлектрических характеристик образцов воды из Кулундинского оз. и донного грунта проводили на частоте 1,41 ГГц в интервале температуры 280–320 К для угла зондирования 42,5°. Методика диэлектрических измерений подробно описана в статье (Романов, 2019).

График многолетней динамики (2012–2022) $T_{\text{я}}^O$ приведён на рис. 5. К данным L1C предварительно применялся критерий селекции, исключающий данные с радиометрической погрешностью более 5 К (единичные случаи).

Динамика индекса G , рассчитанная по формуле (5), приведена на рис. 6а. С целью снижения случайной погрешности, связанной с неточным определением площади пикселя SMOS, а также величин площади суши и озера, попадающих в пиксель, проводилось сглаживание данных и расчёт скользящего среднего с периодом 20 дней. Для возможности анализа спутниковых данных и рассчитанных значений G на рис. 6б приведена многолетняя (с 2012 по 2022 г.) динамика дождевых осадков.

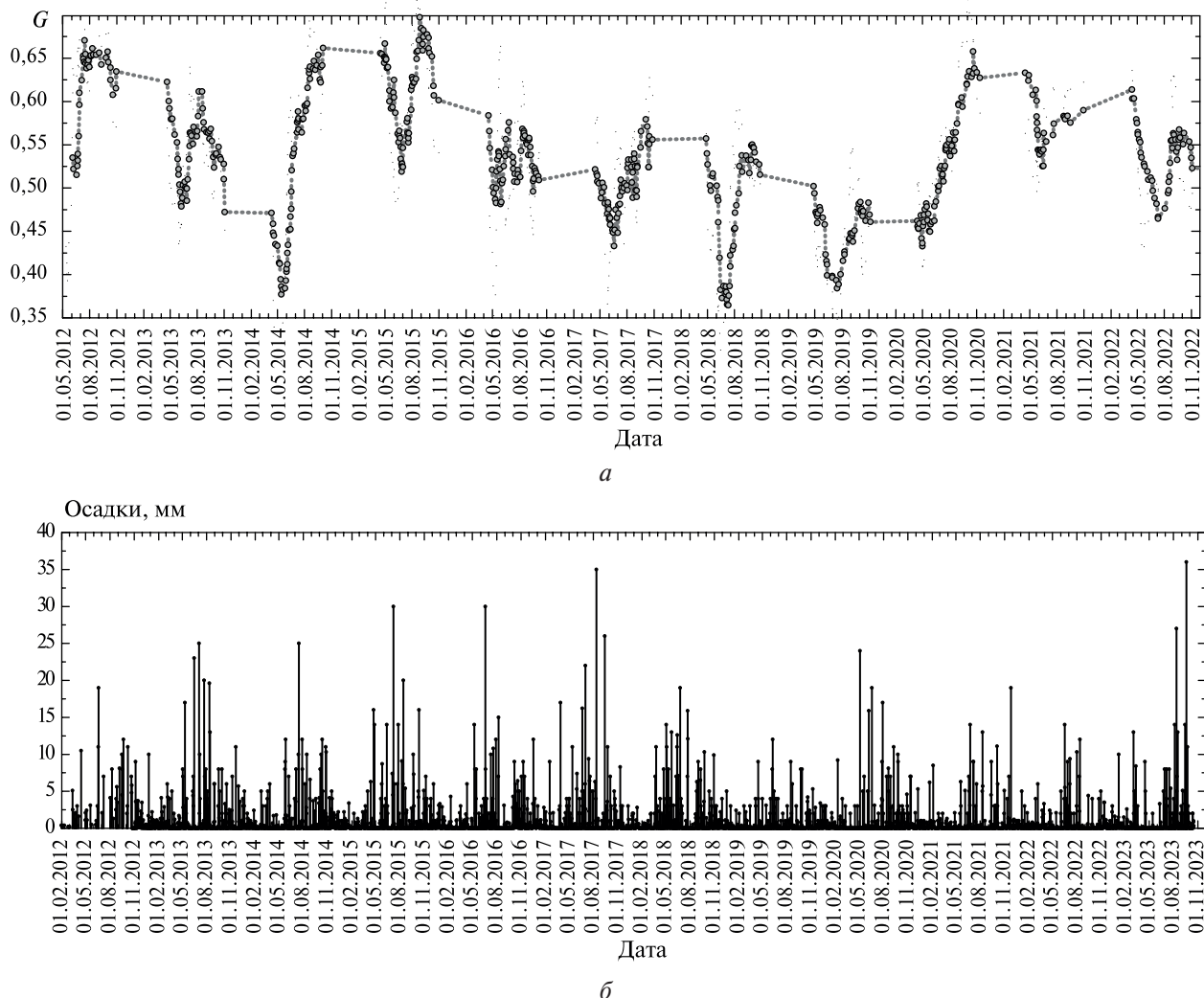


Рис. 6. Многолетняя динамика G (а) и осадков (б) для Кулундинского оз.

Согласно определению, G изменяется от 0 до 1. При $G = 0$ вся акватория озера покрыта водой. Так как на частоте 1,41 ГГц скин-слой для солёной воды (110–140 г/л) не превышает долей сантиметра, то в этом случае наличие слоя воды толщиной в несколько миллиме-

тров на поверхности оголённого дна по данным микроволнового зондирования может быть интерпретировано как водная поверхность. Соответственно, дождевые осадки, смачивающие поверхность осушенного дна, могут привести к ошибке интерпретации спутниковых данных микроволнового диапазона.

При $G = 1$ возникает ситуация, когда всё озеро высохло. Для небольших по площади и неглубоких степных солёных озёр Кулундинской равнины, пересыхающих в течение жаркого лета и наполняющихся в весенний период, подобная ситуация не является редкой. Для крупного озера высыхание может оказаться катастрофическим и сопровождаться уничтожением его сложившейся экосистемы.

При дистанционном микроволновом зондировании также следует учитывать тот факт, что образование в зимний период на поверхности солёного озера ледяного покрова (солёного льда) может затруднить оценку усыхания озера за счёт значительных различий диэлектрических характеристик льда, солёного грунта и солёной воды. При этом диэлектрические характеристики солёного льда оказываются более близкими к диэлектрическим характеристикам солёного грунта, нежели солёной воды. Соответственно, в зимний период оценка G может быть связана со значительной погрешностью.

Обсуждение

Использование разработанного алгоритма оценки усыхания минерального озера и расчёта дистанционного микроволнового индекса ГЗ было апробировано на Кулундинском оз. Данный алгоритм может быть использован для территории с несколькими усыхающими озёрами, попадающими в пиксель спутникового радиометра, до их полного усыхания и образования на их месте солончаков. Для глубоких озёр, расположенных в котловинах с высокими берегами, данный алгоритм неприемлем, так как в этом случае при усыхании озера будет изменяться в первую очередь его глубина, а не площадь. Для дистанционного контроля уровня воды в водоёмах суши находят широкое применение методы радиолокационной альтиметрии (Enguehard et al., 2023).

Погрешность дистанционной оценки площади усыхания озера и определения G зависит от следующих факторов:

1. При вычислении вклада излучения самого озера в общее излучение степи и озера, регистрируемое со спутника, используется значение сигнала в опорной ячейке, удалённой от берега озера на расстояние 50 км. Почвы этих двух участков степи схожи по своему химическому составу, общей минерализации и, соответственно, своим диэлектрическим характеристикам. Однако пространственная неравномерность выпадения осадков и, следовательно, разная степень увлажнённости излучающей поверхности на двух участках может приводить к различию их $T_{я}$ даже при одинаковых T , которые также могут для двух участков степи различаться. Это может приводить к ошибкам в определении $T_{я}^0$ озера.

2. При вычислении $T_{я}^0$ по формуле (2) в алгоритме максимальная площадь озера принимается равной 720 км², а условная площадь пятна диаграммы направленности антенны (ДНА) радиометра MIRAS (англ. Microwave Imaging Radiometer Using Aperture Synthesis) — 2040 км². Эти оценки могут быть недостаточно точны, что приводит к ошибкам в определении $T_{я}^0$. Пятно ДНА по уровню 3 дБ представляет собой пересечение поверхности Земли с конусом, ось которого составляет угол около 42,5° к нормали, — деформированный эллипс с осями примерно 35 и 65 км. Ориентация осей эллипса непостоянна (изменяется от одного измерения к другому), а положение центра эллипса может удаляться от центра ячейки на расстояние до 8 км. Эти статистически не слишком существенные по сравнению с масштабом исследуемого объекта колебания положения и площади пятна ДНА могут в частных случаях приводить к заметным погрешностям в определении $T_{я}^0$. Для снижения погрешности в настоящей работе рассчитывались скользящие средние G с периодом 20 дней.

3. $T_{я}$ и T подстилающей поверхности используются в расчёте совместно, однако их измерение со спутников происходит не одновременно. Утром интервал между измерениями

с разных спутников составляет 2–3 ч. T измеряется около 4–5 ч местного времени, $T_{\text{я}}$ — около 6–7 ч. По результатам наших наземных экспедиций установлено, что в это время суток $T_{\text{в}}$ и $T_{\text{д}}$ не испытывают существенной динамики. Различия не превосходят 2–3 К. Чтобы считать такое утверждение справедливым на протяжении всего периода наблюдений, требуется провести долговременный подспутниковый мониторинг температуры поверхности. В вечернее время интервал между измерениями с разных спутников составляет более 3 ч. Значения $T_{\text{в}}$ и $T_{\text{д}}$ могут заметно изменяться за это время, особенно летом. Для минимизации ошибок следует отказаться от использования данных спутниковых измерений в вечерний период.

4. При расчёте индекса G , помимо $T_{\text{я}}^{\text{о}}$, $T_{\text{в}}$, $T_{\text{д}}$, определяемых дистанционно, алгоритм опирается на модельные зависимости (6)–(7), полученные в лабораторных условиях для конкретных значений солёности озёрной воды и влажности донных отложений. В действительности же эти существенно влияющие на излучательную способность поверхности характеристики могут испытывать значительные колебания значений, например за счёт выпадения жидких осадков.

Заключение

Совместный анализ спутниковых данных SMOS, MODIS, наземных и лабораторных измерений, осуществлённый на примере Кулундинского оз., позволил выявить значительные сезонные вариации микроволнового излучения мелководных минерализованных озёр. Показано, что скорость усыхания водоёма и площадь водного зеркала могут быть оценены по изменению радиояркостной температуры подстилающей поверхности. На этой основе разработан алгоритм дистанционной оценки площади усыхания минерализованного озера и предложен дистанционный микроволновый индекс гидрологической засухи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 22-17-20041 (<https://rscf.ru/project/22-17-20041/>).

Литература

1. Добровольский С. Г. Засухи мира и их эволюция во времени: сельскохозяйственный, метеорологический и гидрологический аспекты // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 2. С. 119–132. DOI: 10.7868/S0321059615020042.
2. Догановский А. М., Мякишева Н. В., Прокофьева Т. И. Водный баланс озер зоны недостаточного увлажнения // Проблемы современной гидрологии: сб. ст. СПб.: РГГМУ, 2004. С. 66–76.
3. Владимиров А. М. Классификация гидрологических засух // Ученые записки Российского гос. гидрометеорол. ун-та. 2012. № 23. С. 5–12.
4. Владимиров А. М., Малышева Н. Г. Оценка вероятности появления гидрологической засухи // Ученые записки Российского гос. гидрометеорол. ун-та. 2012. № 24. С. 5–17.
5. Лебедева (Верба) М. П., Лопухина О. В., Калинина Н. В. Особенности химико-минералогического состава солей в сорowych солончаках и озерах Кулундинской степи // Почвоведение. 2008. № 4. С. 467–480.
6. Ниязов Дж. Б., Калашникова О. Ю. Использование снимков MODIS в оценке экологических рисков, связанных с опасными гидрологическими явлениями // Изв. вузов Кыргызстана. 2018. № 11. С. 55–59.
7. Рахмуни А., Медди М., Хамуди Сааед А. Влияние метеорологической засухи и характеристик бассейна на проявления гидрологической засухи на северо-западе Алжира // Метеорология и гидрология. 2022. № 9. С. 94–107. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-9-94-107.
8. Романов А. Н. Влияние влажности и температуры на диэлектрические и радиоизлучательные свойства солевой корки содового солончака // Почвоведение. 2019. № 2. С. 194–203. DOI: 10.1134/S0032180X19020126.
9. Романов А. Н., Хвостов И. В. Космический микроволновый мониторинг засоленных почв и соленых озер Кулундинской равнины. Барнаул: ООО «Пять плюс». 2017. 88 с.
10. De Natale F., Alilla R., Parisse B., Nardi P. A bibliometric analysis on drought and heat indices in agriculture // Agricultural and Forest Meteorology. 2023. V. 341. Article 109626. DOI: 10.1016/j.agrformet.2023.109626.

11. *Enguehard P., Frappart F., Zeiger P. et al.* Contribution of automatically generated radar altimetry water levels from unsupervised classification to study hydrological connectivity within Amazon floodplains // *J. Hydrology: Regional Studies*. 2023. V. 47. Article 101397. DOI: 10.1016/j.ejrh.2023.101397.
12. *Feng L., Hu C., Chen X.* Satellites Capture the Drought Severity Around China's Largest Freshwater Lake // *J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2012. V. 5. No. 4. P. 1266–1271. DOI: 10.1109/JSTARS.2012.2188885.
13. *Foroumandi E., Nourani V., Kantoush S.A.* Investigating the main reasons for the tragedy of large saline lakes: Drought, climate change, or anthropogenic activities? A call to action // *J. Arid Environments*. 2022. V. 196. Article 104652. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2021.104652.
14. *Gutierrez A., Castro R., Vieira P. et al.* SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model. Lisboa: DEIMOS Engenharia, 2017. 83 p. <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/SMOS-L1c-Data-Processing-Models.pdf>.
15. *Haxhismajli B., Hajrizi E., Qehaja B. et al.* Image Analysis of Water Level using Remote Sensing // 29th Intern. Conf. Systems, Signals and Image Processing. Sofia, Bulgaria, 2022. P. 1–6. DOI: 10.1109/IWSSIP55020.2022.9854490.
16. *Isikdogan F., Bovik A. C., Passalacqua P.* Surface Water Mapping by Deep Learning // *J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2017. V. 10. No. 11. P. 4909–4918. DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2735443.
17. *Keller A.A., Garner K., Rao N. et al.* Hydrological models for climate-based assessments at the watershed scale: A critical review of existing hydrologic and water quality models // *Science of the Total Environment*. 2023. V. 867. Article 161209. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.161209.
18. *Lai C., Zhong R., Wang Z. et al.* Monitoring hydrological drought using long-term satellite-based precipitation data // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 649. P. 1198–1208. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.245.
19. *Sahr K., White D., Kimerling A.J.* Geodesic Discrete Global Grid Systems. *Cartography and Geographic Information Science*. 2003. V. 30. P. 121–134.
20. *Schaepman M.E.* Spectrodirectional remote sensing: From pixels to processes // *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2007. V. 9. No. 2. P. 204–223.
21. *Su Z., Roebeling R.A., Schulz J. et al.* Observation of Hydrological Processes Using Remote Sensing // *Treatise on Water Science*. 2011. V. 2. P. 351–399.
22. *Sur C., Park S.-Y., Kim J.-S., Lee J.-H.* Prognostic and diagnostic assessment of hydrological drought using water and energy budget-based indices // *J. Hydrology*. 2020. V. 591. Article 125549. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125549.
23. *Svoboda M., Fuchs B.A.* Handbook of Drought Indicators and Indices. Geneva, 2016. 45 p. https://www.droughtmanagement.info/literature/GWP_Handbook_of_Drought_Indicators_and_Indices_2016.pdf
24. *Yang P., Xia J., Chen Y. et al.* Dynamic evolution of recent droughts in Central Asia based on microwave remote sensing satellite products // *J. Hydrology*. 2023. V. 620. Pt. B. Article 129497. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129497.
25. *Zhang L., Jiao W., Zhang H. et al.* Studying drought phenomena in the Continental United States in 2011 and 2012 using various drought indices // *Remote Sensing of Environment*. 2017. V. 190. P. 96–106. DOI: 10.1016/j.rse.2016.12.010.
26. *Zhang Q., Shi R., Xu C.-Y. et al.* Multisource data-based integrated drought monitoring index: Model development and application // *J. Hydrology*. 2022. V. 615. Pt. A. Article 128644. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128644.
27. *Zhang X., Hao Z., Singh V.P. et al.* Drought propagation under global warming: Characteristics, approaches, processes, and controlling factors // *Science of the Total Environment*. 2022. V. 838. Pt. 2. Article 156021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156021.

Towards the development of a remote microwave indicator of hydrological drought (case study of seasonal drying of a hyperhaline lake)

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

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

E-mail: ran@iwep.ru

This paper presents the results of a 10-year study of seasonal variations in brightness temperatures of the hyperhaline Kulunda Lake located on the territory of the Kulunda Plain (southern Western Siberia) characterized by an arid climate with low annual precipitation. On their basis, a new approach to the development of a remote microwave index of hydrological drought is proposed. The analysis of the seasonal dynamics of brightness (T_b) and thermodynamic temperatures of the lake water surface was carried out using the L1C SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) and MOD11A1 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) products. The L1C product contains T_b values obtained at a sounding angle of 42.5° on horizontal and vertical polarizations and is linked to the discrete geodetic grid DGG ISEA 4H9 (Icosahedral Snyder Equal Area). On the basis of the results of laboratory measurements of dielectric characteristics of water from Lake Kulunda and bottom soil, experimental dependences of the emissivity coefficients of the water surface and the dried bottom on temperature were established. Using satellite optical data, the patterns of seasonal drying out of the lake were studied and periodic drying cycles were identified. The developed algorithm can be used for an area with several drying lakes that lie within a pixel of satellite radiometer.

Keywords: salinity, mineral lake, emissivity, radio brightness temperature, SMOS satellite, Western Siberia

Accepted: 31.10.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-222-233

References

1. Dobrovolsky S. G., Droughts of the world and their evolution over time: agricultural, meteorological and hydrological aspects, *Water resources*, 2015, Vol. 42, No. 2, pp. 119–132 (in Russian), DOI: 10.7868/S0321059615020042.
2. Doganovsky A. M., Myakisheva N. V., Prokofieva T. I., Water balance of lakes in the zone of insufficient moisture, In: *Problemy sovremennoi gidrologii*, 2004, pp. 66–76 (in Russian).
3. Vladimirov A. M., Classification of hydrological droughts, *Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*, 2012, No. 23, pp. 5–12 (in Russian).
4. Vladimirov A. M., Malysheva N. G., Estimation of the probability of occurrence of hydrological drought, *Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*, 2012, No. 24, pp. 5–17 (in Russian).
5. 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).
6. Niyazov Dj. B., Kalashnikova O. Yu., Use of MODIS imagery in assessing environmental risks associated with associated with water-related hazards, *News of Universities of Kyrgyzstan*, 2018, No. 11, pp. 55–59 (in Russian).
7. Rahmouni A., Meddi M., Hamoudi Saaed A., Hydrological drought response to meteorological drought propagation and basin characteristics: a case study for northwest of Algeria, *Meteorology and Hydrology*, 2022, No. 9, pp. 94–107 (in Russian), DOI: 10.52002/0130-2906-2022-9-94-107.
8. Romanov A. N., Influence of water content and temperature on the dielectric and radio-emitting properties of the salt crust of puffy solonchak, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 2, pp. 171–179, DOI: 10.1134/S1064229319020121.
9. Romanov A. N., Khvostov I. V., *Kosmicheskii mikhrovolnovyi monitoring zasolennykh pochv i solenikh ozer Kulundinskoj ravniny* (Space microwave monitoring of saline soils and salt lakes of the Kulunda Plain), Barnaul: OOO “Pyat’ plyus”, 2017, 88 p. (in Russian).
10. De Natale F., Alilla R., Parris B., Nardi P., A bibliometric analysis on drought and heat indices in agriculture, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, Vol. 341, Article 109626, DOI: 10.1016/j.agrformet.2023.109626.

11. Enguehard P., Frappart F., Zeiger P. et al., Contribution of automatically generated radar altimetry water levels from unsupervised classification to study hydrological connectivity within Amazon floodplains, *J. Hydrology: Regional Studies*, 2023, Vol. 47, Article 101397, DOI: 10.1016/j.ejrh.2023.101397.
12. Feng L., Hu C., Chen X., Satellites Capture the Drought Severity Around China's Largest Freshwater Lake, *J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2012, Vol. 5, No. 4, pp. 1266–1271, DOI: 10.1109/JSTARS.2012.2188885.
13. Foroumandi E., Nourani V., Kantoush S.A., Investigating the main reasons for the tragedy of large saline lakes: Drought, climate change, or anthropogenic activities? A call to action, *J. Arid Environments*, 2022, Vol. 196, Article 104652, DOI: 10.1016/j.jaridenv.2021.104652.
14. Gutierrez A., Castro R., Vieira P. et al., *SMOS L1 Processor L1c Data Processing Model*, Lisboa: DEIMOS Engenharia, 2017, 83 p., <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/SMOS-L1c-Data-Processing-Models.pdf>.
15. Haxhismajli B., Hajrizi E., Qehaja B. et al., Image Analysis of Water Level using Remote Sensing, *29th Intern. Conf. Systems, Signals and Image Processing*, Sofia, Bulgaria, 2022, pp. 1–6, DOI: 10.1109/IWSSIP55020.2022.9854490.
16. Isikdogan F., Bovik A. C., Passalacqua P., Surface Water Mapping by Deep Learning, *J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, Vol. 10, No. 11, pp. 4909–4918, DOI: 10.1109/JSTARS.2017.2735443.
17. Keller A. A., Garner K., Rao N. et al., Hydrological models for climate-based assessments at the watershed scale: A critical review of existing hydrologic and water quality models, *Science of the Total Environment*, 2023, Vol. 867, Article 161209, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.161209.
18. Lai C., Zhong R., Wang Z. et al., Monitoring hydrological drought using long-term satellite-based precipitation data, *Science of the Total Environment*, 2019, Vol. 649, pp. 1198–1208, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.08.245.
19. Sahr K., White D., Kimerling A. J., Geodesic Discrete Global Grid Systems, *Cartography and Geographic Information Science*, 2003, Vol. 30, pp. 121–134.
20. Schaepman M. E., Spectrodirectional remote sensing: From pixels to processes, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2007, Vol. 9, No. 2, pp. 204–223.
21. Su Z., Roebeling R. A., Schulz J. et al., Observation of Hydrological Processes Using Remote Sensing, *Treatise on Water Science*, 2011, Vol. 2, pp. 351–399.
22. Sur C., Park S.-Y., Kim J.-S., Lee J.-H., Prognostic and diagnostic assessment of hydrological drought using water and energy budget-based indices, *J. Hydrology*, 2020, Vol. 591, Article 125549, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125549.
23. Svoboda M., Fuchs B. A., *Handbook of Drought Indicators and Indices*, Geneva, 2016, 45 p., https://www.droughtmanagement.info/literature/GWP_Handbook_of_Drought_Indicators_and_Indices_2016.pdf
24. Yang P., Xia J., Chen Y. et al., Dynamic evolution of recent droughts in Central Asia based on microwave remote sensing satellite products, *J. Hydrology*, 2023, Vol. 620, Pt. B, Article 129497, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.129497.
25. Zhang L., Jiao W., Zhang H. et al., Studying drought phenomena in the Continental United States in 2011 and 2012 using various drought indices, *Remote Sensing of Environment*, 2017, Vol. 190, pp. 96–106, DOI: 10.1016/j.rse.2016.12.010.
26. Zhang Q., Shi R., Xu C.-Y. et al., Multisource data-based integrated drought monitoring index: Model development and application, *J. Hydrology*, 2022, Vol. 615, Pt. A, Article 128644, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.128644.
27. Zhang X., Hao Z., Singh V. P. et al., Drought propagation under global warming: Characteristics, approaches, processes, and controlling factors, *Science of the Total Environment*, 2022, Vol. 838, Pt. 2, Article 156021, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.156021.