

XXI международная конференция
«Современные проблемы дистанционного
зондирования Земли из космоса»
13 - 17 ноября 2023 г.

К РАЗРАБОТКЕ ДИСТАНЦИОННОГО МИКРОВОЛНОВОГО ИНДЕКСА ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАСУХИ (на примере Кулундинского озера)

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

Институт водных и экологических проблем СО РАН,
656038, Алтайский край, Барнаул, ул. Молодежная, д. 1,
E-mail: romanov_alt@mail.ru

Актуальность

Гидрологическая засуха (ГЗ) представляет собой опасное природное явление, способное привести к деградации водоемов суши, в том числе, к повышению солёности, ухудшению качества воды, изменению ихтиофауны.

В периоды ГЗ происходит снижение уровней воды в реках, усыхание озёр, уменьшение запасов грунтовых вод.

К основным факторам, способствующим развитию ГЗ, относятся климатические особенности региона, характеристики водосборного бассейна, а также деятельность человека [1, 2]. В [3] систематизированы физико-географические и антропогенные факторы, создающие ГЗ.

Подробный анализ ГЗ в мире с 1980 по 2008 годы приведен в [4].

В качестве классификационных признаков засух используются продолжительности экстремальных значений температуры и влажности природных сред (воздух, почва), уровни и расходы воды в водных объектах.

Для прогнозирования ГЗ широко используются спутниковые снимки **MODIS** [5], **Landsat** [6]. Обзор дистанционных индексов засухи приведен в (7)

1. Zhang Q., Shi R., Xu C.-Y., et al. Multisource data-based integrated drought monitoring index: Model development and application // *Journal of Hydrology*. 2022. V. 615. Part A. Article 128644.
2. 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.
3. Владимирова А.М. Классификация гидрологических засух // *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2012. № 23. С. 5-12.
4. Добровольский С.Г. Засухи мира и их эволюция во времени: сельскохозяйственный, метеорологический и гидрологический аспекты // *Водные ресурсы*. 2015. Т. 42. № 2. С. 119-132.
5. Ниязов Дж.Б., Калашникова О.Ю. Использование снимков MODIS в оценке экологических рисков, связанных с опасными гидрологическими явлениями//*Известия ВУЗов Кыргызстана*. 2018. № 11. С. 55-59.
6. Isikdogan F., Bovik A.C., Passalacqua P. Surface Water Mapping by Deep Learning // *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2017. V. 10. No. 11. P. 4909-4918.
7. 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



Дно высохшего озера

Цель исследований - анализ сезонных вариаций радиоярких температур гипергалинного Кулундинского озера с 2012 по 2022 годы и разработка дистанционного микроволнового индекса ГЗ.

Объект исследования - акватория Кулундинского озера и окружающая его степь, попадающие в пиксель спутника SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity).

- ❑ Кулундинское озеро - одно из крупнейших минеральных озер Российской Федерации.
- ❑ В результате внутривековых циклов колебаний водности и ежегодного усыхания площадь водной поверхности изменяется от 728 до 615 км².
- ❑ Озеро мелководное, средняя глубина озера - 2.5-3 метра, берега пологие.
- ❑ По химическому составу вода из озера относится к сульфатно-хлоридным рапам.
- ❑ 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 < 3% путем маскирования спутниковых снимков оптического диапазона.



Обводненное и высохшее дно Кулундинского озера

Методика исследований

- ❑ Для определения радиояркостной температуры ($T_{\text{Я}}$) подстилающей поверхности использовался продукт L1C SMOS.
- ❑ Продукт L1C содержит значения $T_{\text{Я}}$, полученные для угла зондирования 42.5° на горизонтальной и вертикальной поляризациях.
- ❑ Продукт L1C привязан к дискретной геодезической сетке DGG ISEA 4Н9 (Discrete Global Grid Icosahedral Snyder Equal Area).
- ❑ Линейный размер ячейки составляет 16 км, площадь 195 км^2 . Продольная и поперечная разрешающая способность для угла зондирования 42.5° составляет 64 и 35 км соответственно.

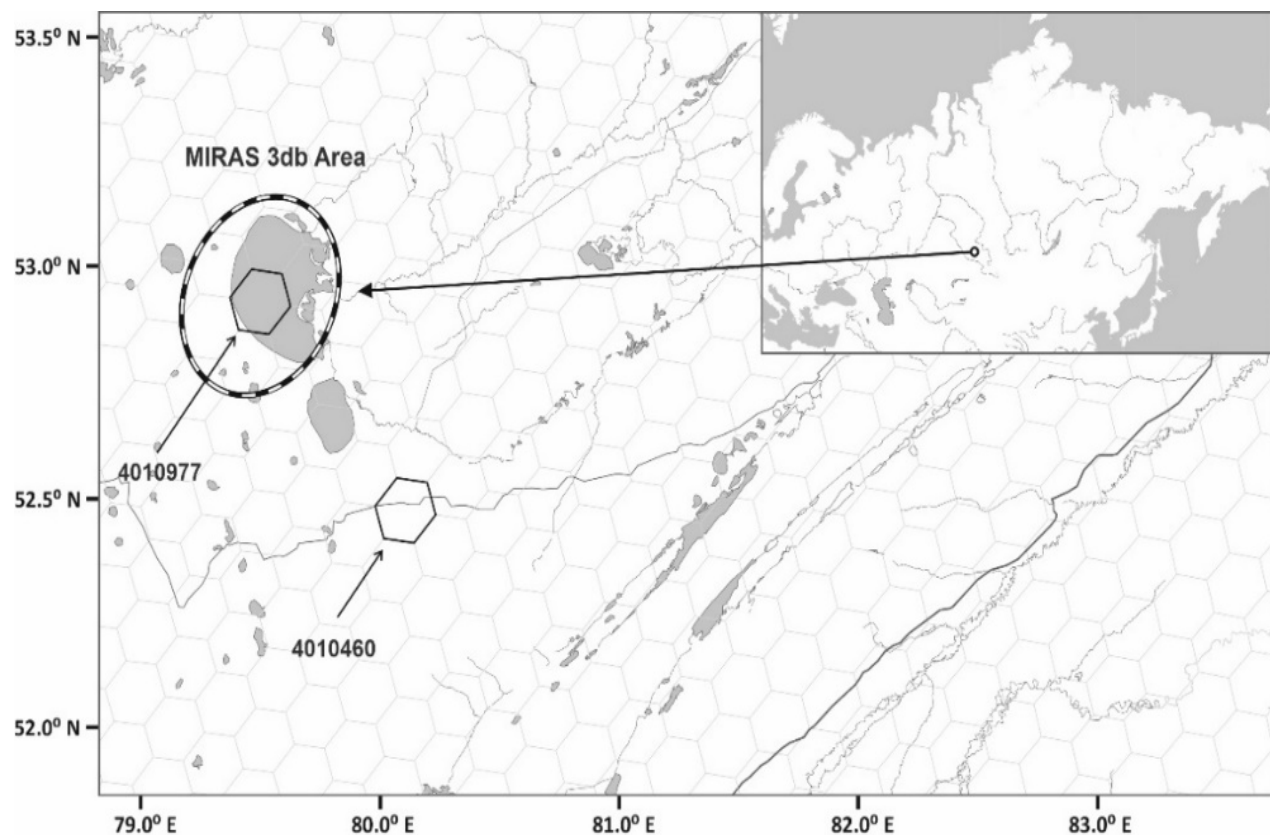


Рис. 1. Карта-схема исследуемой территории с геодезическими ячейками

Результаты исследований

Усыхание озера может быть определено по спутниковым данным в оптическом диапазоне (Sentinel 2, уровень L2a NDWI). На рис. 2 приведены значения площади озера (S_O), определенные по спутниковым изображениям в оптическом диапазоне. Видно, что сезонное поведение S_O в разные годы различно.

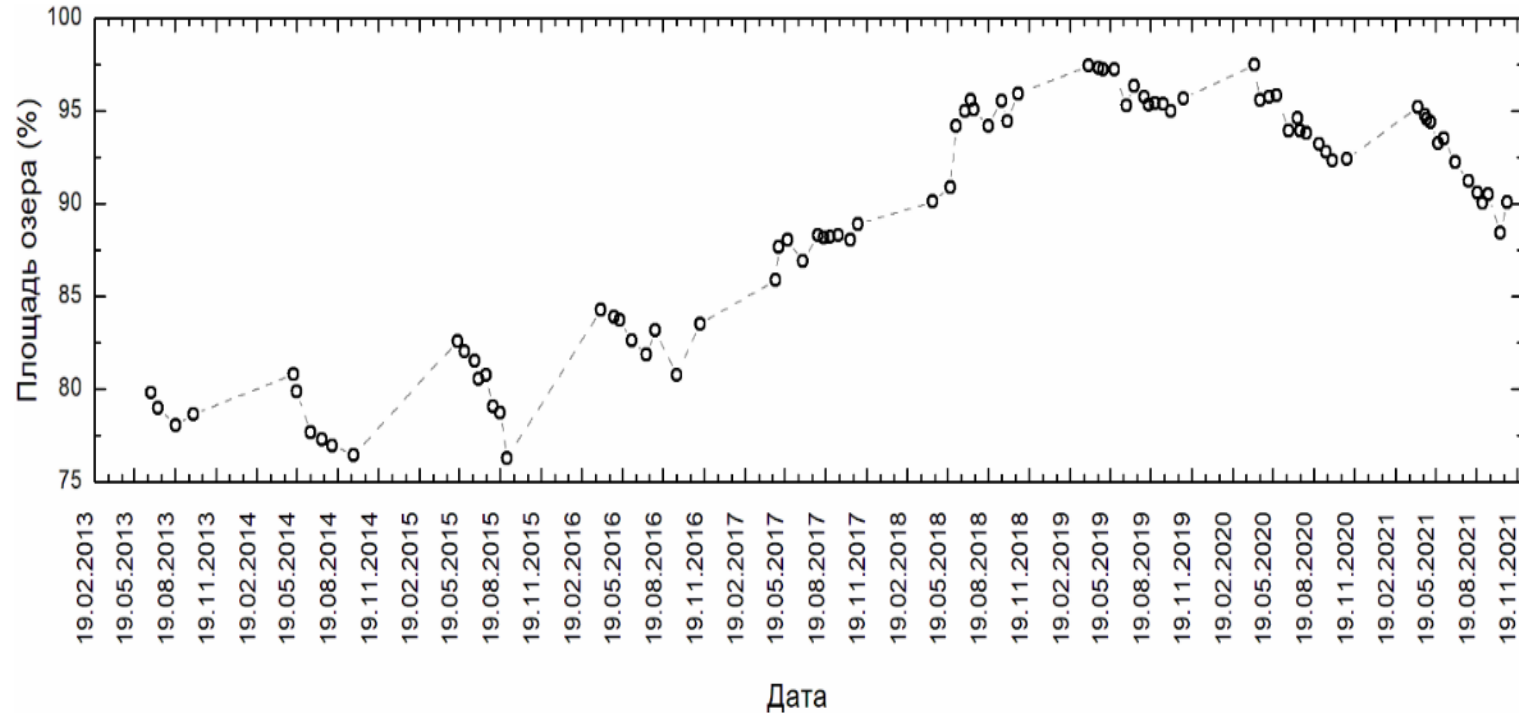


Рис. 2. Площадь водной поверхности Кулундинского озера, определенная по данным спутника Sentinel 2

С 2013 по 2015 и с 2019 по 2021 годы 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.

С 2017 по 2018 годы наблюдается обратное поведение сезонной динамики S_O , связанное с тем, что S_O к концу теплого 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.



Сильно увлажненный грунт может восприниматься как водная поверхность, что приводит к возрастанию погрешности.

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

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

Здесь $T_{\text{я}}, T_{\text{я}}^{\text{C}}$, – радиояркостные температуры пикселя, включающего степь и озеро (ячейка № 4010977), и пикселя, включающего только степь (№ 4010460), $T_{\text{я}}^{\text{O}}$ – радиояркостная температура озера, $S_{\text{C}}, S_{\text{O}}^{\text{max}}$ – площади степи и озера,

$$T_{\text{я}}^{\text{O}} = T_{\text{я}}^{\text{C}} + (T_{\text{я}} - T_{\text{я}}^{\text{C}})(S/S_{\text{O}}^{\text{max}}), (2)$$

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

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

где $T_{\text{я}}^{\text{В}}, T_{\text{я}}^{\text{Д}}$ – $T_{\text{я}}$ водной поверхности и осушенного дна.

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

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

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

$$G = (S_{\text{д}}/S_{\text{O}}^{\text{max}}) = (T_{\text{я}}^{\text{O}} - T_{\text{я}}^{\text{В}})/(T_{\text{я}}^{\text{Д}} - T_{\text{я}}^{\text{В}}). (5)$$

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 $T_{Я}^B, T_{Я}^D$ рассчитывали по следующим формулам [8]

$$T_{Я}^B = \chi_H^B \cdot T_B, T_B = 273...303 \text{ К},$$

$$T_{Я}^D = \chi_H^D \cdot T_D, T_D = 273...303 \text{ К},$$

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

$$\chi_H^D(T) = 1,45162 - 0,0033 \cdot T, \sigma = 0,003. \quad (7)$$

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

Лабораторные измерения диэлектрических характеристик образцов воды из Кулундинского озера и донного грунта проводили на частоте 1.41 ГГц в интервале температур 280-320 К для угла зондирования 42,5°. Подробная методика диэлектрических измерений подробно описана в [8, 9].

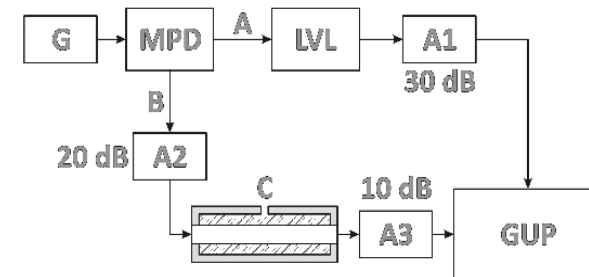
8. Романов А.Н. Влияние влажности и температуры на диэлектрические и радиоизлучательные свойства солевой корки содового солончака // Почвоведение. 2019. № 2. С. 194-203.

9. Романов А.Н., Хвостов И.В. Космический микроволновый мониторинг засоленных почв и соленых озер Кулундинской равнины. Барнаул. 2017. 88 с.



Высохшее дно Кулундинского озера

Блок-схема лабораторной установки на основе измерителя фаз ФК2-18.



Температуры тестовых участков

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 годы (первые 5 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 года, вследствие увеличения уровня воды в озере, этот участок частично или полностью затапливался.

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 годы, 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 . T_C и T_D не совпадают.

Абсолютные значения T_D коррелируют со значениями T_B . При этом утренние и вечерние измерения следует рассматривать по отдельности. На рис. 3 представлены измерения T_D с мая по октябрь в 2012-2016 годах

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

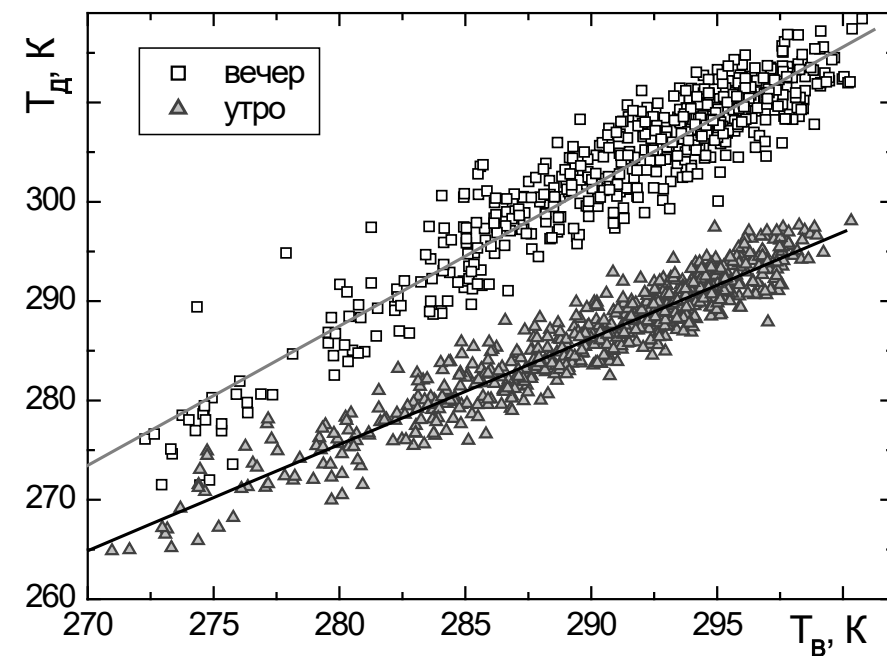


Рис. 3. Линейная зависимость $T_D(T_B)$.

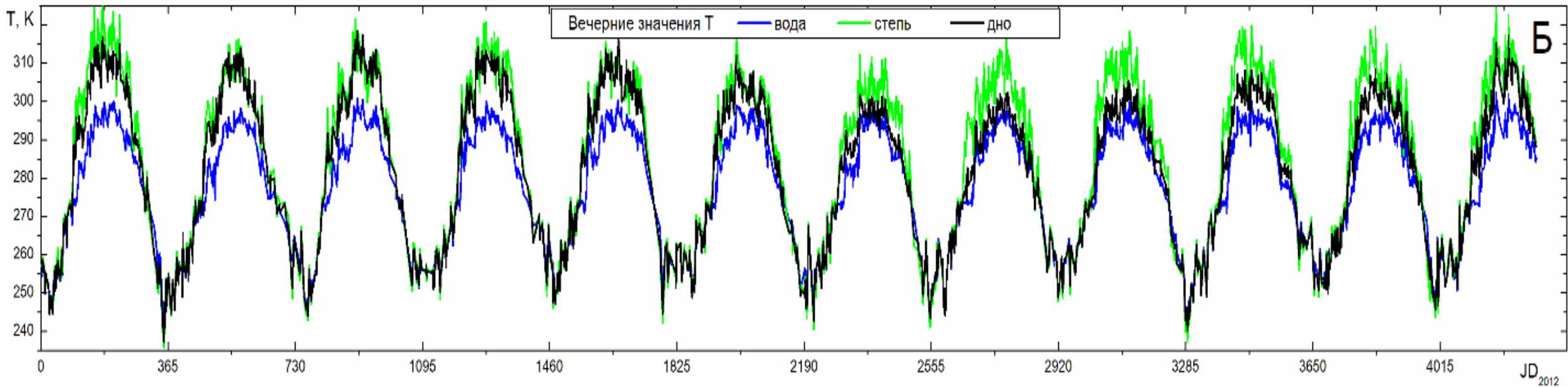
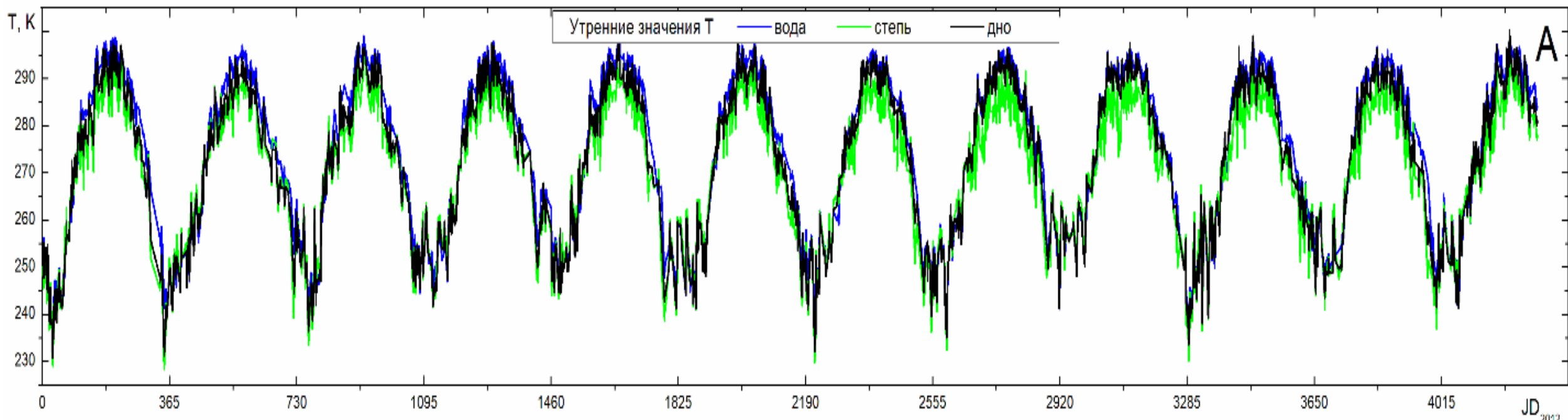


Рис. 4. Динамика утренних (А) и вечерних(Б) (по UTC) значений T_C , T_B , T_D (UTC – всемирное координатное время).

На первом этапе оценивали излучение всего объекта (водная поверхность + периодически высыхающее дно). Для этого из сигнала ячейки 4010977, содержащей объект и степь, исключали вклад степи (рис. 5)

$$T_{\text{Я}}^O = T_{\text{Я}}^{4010460} + (T_{\text{Я}}^{4010977} - T_{\text{Я}}^{4010460}) \cdot (S_{\text{MIRAS}}/S_O^{\text{max}}),$$

$$S_{\text{MIRAS}} = 2040\text{км}^2, S_O^{\text{max}} = 720\text{км}^2.$$

График многолетней динамики (2012-2022) $T_{\text{Я}}^O$ приведен на рис. 5. К данным L1С предварительно применялся критерий селекции, исключающий данные с радиометрической погрешностью более 5 К (единичные случаи).

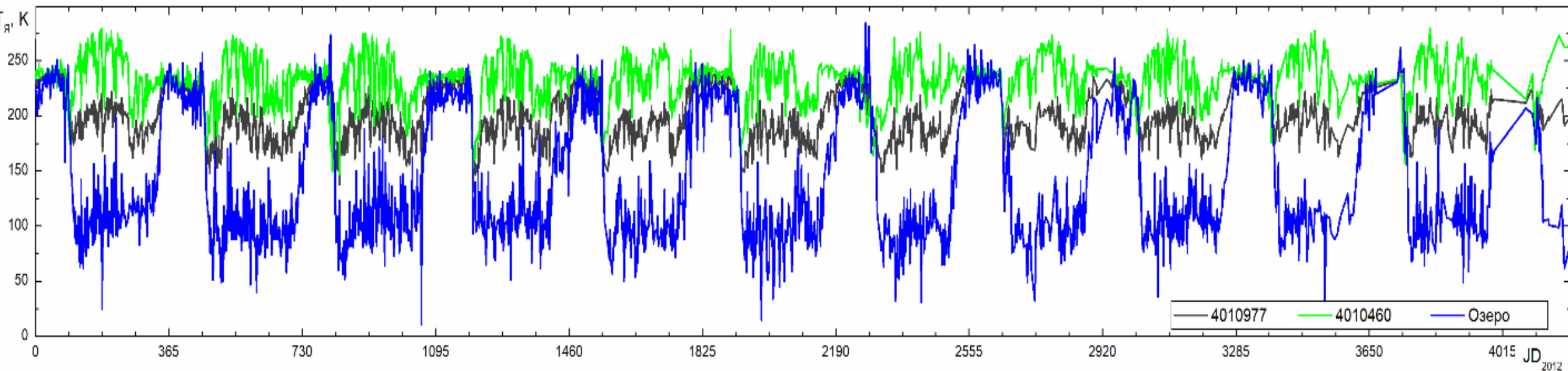


Рис. 5. Динамика $T_{\text{Я}}(\text{JD})$ для ячеек SMOS

На рис. 6а приведена динамика G , рассчитанная по формуле (5). С целью снижения случайной погрешности, связанной неточным определением площади пикселя SMOS, а также площадей суши и озера, попадающих в пиксель, производилось сглаживание данных и расчет скользящего среднего с периодом 20 дней.

Для возможности анализа спутниковых данных и рассчитанных значений G на рис. 6б приведена многолетняя (с 2012 по 2022 годы) динамика дождевых осадков.

Согласно определению, G изменяется от 0 до 1.

При $G=0$ вся акватория озера покрыта водой. На частоте 1.41 ГГц скин-слой для соленой воды (110-140 г/л) не превышает долей сантиметра. В этом случае слой воды толщиной несколько миллиметров на поверхности оголенного дна по данным микроволнового зондирования может быть интерпретирован как водная поверхность. Дождевые осадки, смачивающие поверхность осушенного дна, могут привести к ошибке интерпретации спутниковых данных микроволнового диапазона.

При $G = 1$ возникает ситуация, когда все озеро высохло. Для небольших по площади и неглубоких соленых озер, пересыхающих в жаркий период и наполняющихся в весенний период, подобная ситуация не является редкой. Для крупного озера высыхание может оказаться катастрофическим и сопровождаться уничтожением сложившейся экосистемы озера.

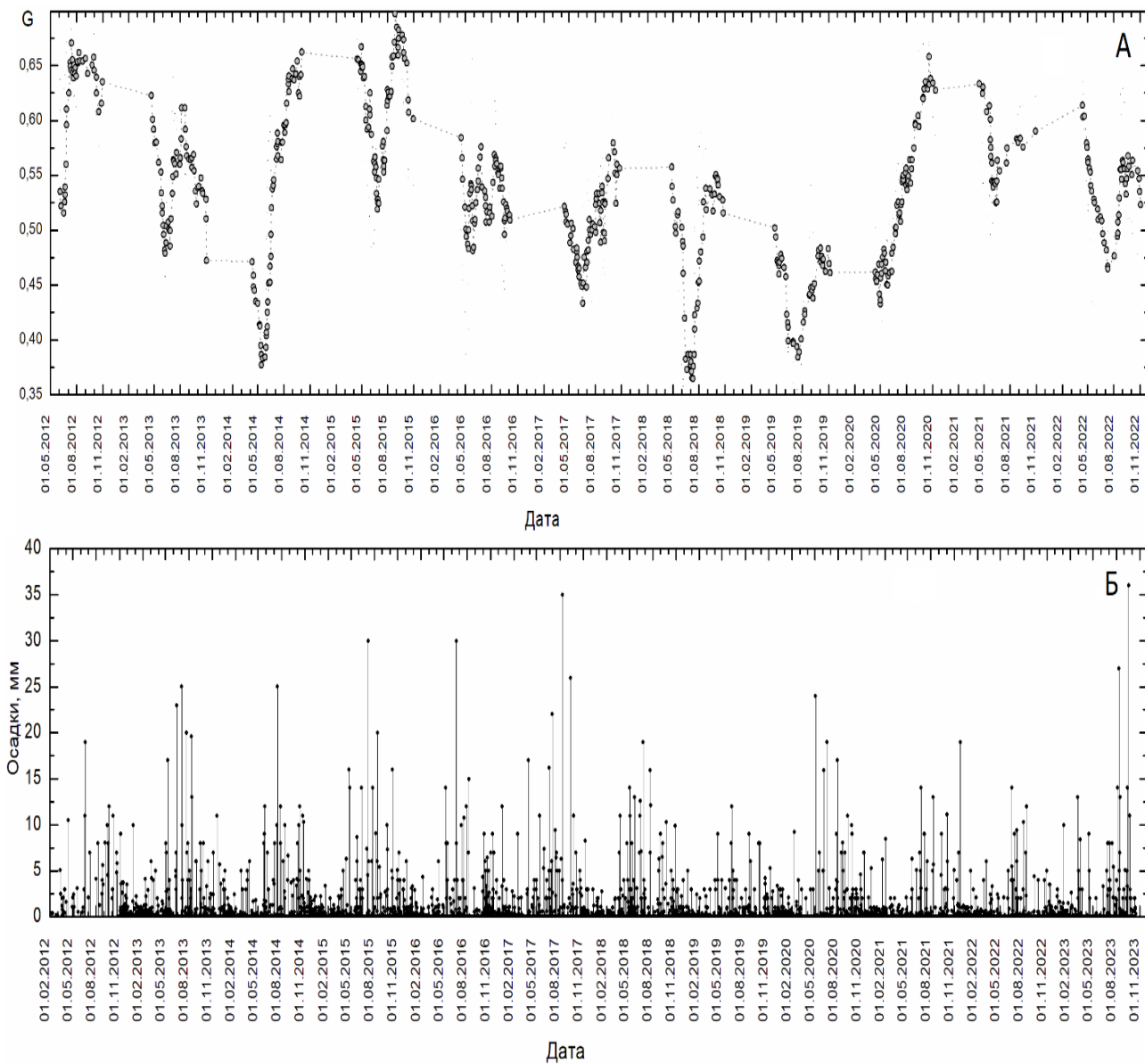


Рис. 6. Многолетняя динамика G (А) и осадков (Б) для Кулундинского озера.

Обсуждение

Разработанный алгоритм оценки усыхания минерального озера и расчета дистанционного микроволнового индекса ГЗ, апробированный на Кулундинском озере, может быть использован для территории с несколькими усыхающими озерами, пропадающими в пиксель спутникового радиометра, до их полного усыхания и образования на их месте солончаков.

Для глубоких озер, 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 водоемах суши находят широкое применение методы радиолокационной альтиметрии.

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

1. Вычисляя вклад 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 увлажненности 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 $T_{я}$ озера.

2. При вычислении $T_{я}^{\circ}$ по формуле (2), в алгоритме максимальная площадь озера принимается равной 720 км², а условная площадь пятна диаграммы направленности антенны (ДНА) MIRAS (Microwave Imaging Radiometer Using Aperture Synthesis) – 2040 км². Эти оценки могут быть недостаточно точны, что приводит к ошибкам в определении $T_{я}^{\circ}$. Пятно ДНА по уровню 3 db 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 не постоянна (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 $T_{я}^{\circ}$. Для снижения погрешности в данной работе рассчитывались скользящие средние G с периодом 20 дней.

Обсуждение

3. $T_{\text{я}}$ 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 часа. T измеряются около 4-5 часов местного времени, $T_{\text{я}}$ – около 6-7 часов. 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 спутниковый мониторинг температур поверхности. В вечернее время интервал между измерениями с разных спутников составляет более 3 часов. 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 расчете индекса G , помимо $T_{\text{я}}^{\circ}$, $T_{\text{в}}$, $T_{\text{д}}$, определяемых дистанционно, алгоритм опирается на модельные зависимости (6)-(7), полученные в лабораторных условиях для конкретных значений солёности озерной 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, осуществленный на примере Кулундинского озера, позволил выявить значительные сезонные вариации микроволнового излучения мелководных минерализованных озер Кулундинской равнины. Показано, что скорость усыхания водоема и площадь водного зеркала могут быть оценены по изменению радиоярких температур подстилающей поверхности. На этой основе предложен алгоритм дистанционной оценки площади усыхания минерализованного озера и разработан дистанционный микроволновый индекс гидрологической засухи.

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 22-17-20041

<https://rscf.ru/project/22-17-20041/>

Спасибо за внимание

Будем рады научному сотрудничеству

[romanov alt@mail.ru](mailto:romanov_alt@mail.ru)