

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ ВОДНО-БОЛОТНЫХ УГОДИЙ БЕЙСУГСКОГО ЛИМАНА И ОЗЕРА ХАНСКОГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДДЗ И ГИС

В.С. Цыбулина¹, И.В. Шевердяев², В.В. Сорокина²

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

² Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону
tsybulina.veronika@mail.ru; ig71089@yandex.ru

Аннотация. Водно-болотные угодья Бейсугского лимана и озера Ханского играют существенную роль в гидрологическом балансе Азовского моря, способствуют стабильности его сложившейся экосистемы, кроме того, они важны для поддержания биоразнообразия. Мониторинг и прогнозирование их состояния имеет большое значение как в экологическом, так и в климатическом аспектах. В данном исследовании выполнена оценка значений площади водной поверхности и околоводной растительности Бейсугского лимана и озера Ханского (с системой более мелких водоемов) с 1985 по 2023 г. с помощью оптических спутниковых снимков Landsat, предоставленных платформой Google Earth Engine (GEE). Дешифрирование снимков выполнено методом классификации на основе многоканальных спектральных индексов (MNDWI и NDVI) в отсутствие облачности. В период 1985–2023 гг. отмечена общая тенденция сокращения площади рассматриваемых водных объектов, о чем свидетельствуют статистически значимые отрицательные коэффициенты линейного тренда. Интенсивность уменьшения площади водного зеркала была наименьшей у Бейсугского лимана (0,7 %), наибольшей – у оз. Ханского (17,2 %) и системы мелких водоемов (16,2 %) за десятилетие. Однако на фоне общего уменьшения площади водных объектов можно выделить периоды повышенной (1985–2008 гг.) и пониженной (2009–2023 гг.) водности. Показана сезонная и многолетняя динамика NDVI растительности на исследуемой территории. Отмечена тенденция увеличения значений NDVI после 2009 г., а также в переходные сезоны (май – апрель, сентябрь – октябрь).

Ключевые слова: Landsat, MNDWI, NDVI, водно-болотные угодья, Бейсугский лиман, озеро Ханское.

Водно-болотные угодья являются одними из важнейших экосистем на Земле и функционируют как «почки» планеты [1]. Однако изменение климата и деятельность человека приводят к сокращению водно-болотных угодий во многих регионах мира. Национальное и международное законодательство направлено на устранение угрозы деградации этих уязвимых экосистем и требует последовательных, долгосрочных схем мониторинга.

Данные и продукты дистанционного зондирования обеспечивают пространственно-временные представления о водных объектах и ресурсах, а их интеграция в научные исследования и программы мониторинга обеспечивает лучшее понимание экологии водоемов, качества воды, ее запасов, а также состояния прибрежных экосистем.

Данное исследование выполнено в рамках проекта «Изучение гидроклиматических особенностей периодически пересыхающих акваторий юга России в контексте глобального углеродного цикла», в период производственной практики студентки МГУ В.С. Цыбулиной в молодежной

лаборатории многокомпонентного мониторинга периодически пересыхающих акваторий юга России ЮНЦ РАН.

Целью работы является оценка многолетних изменений площади водной поверхности и сезонной динамики растительности водно-болотных угодий Бейсугского лимана, оз. Ханского и системы более мелких лиманов и озер с помощью оптических спутниковых снимков среднего пространственного разрешения Landsat (рис. 1).

Материалы и методы. Расчет изменения площади водного зеркала водоемов и динамики растительности выполнен с использованием данных ДЗЗ в QGIS.

Для установленного территориального охвата были задействованы комические снимки среднего пространственного разрешения Landsat-5, Landsat-8, Landsat-9, что вполне удовлетворяет требованиям детальности в рамках выбранного объекта исследования.

Для наиболее оптимального нахождения космических изображений спутников Landsat

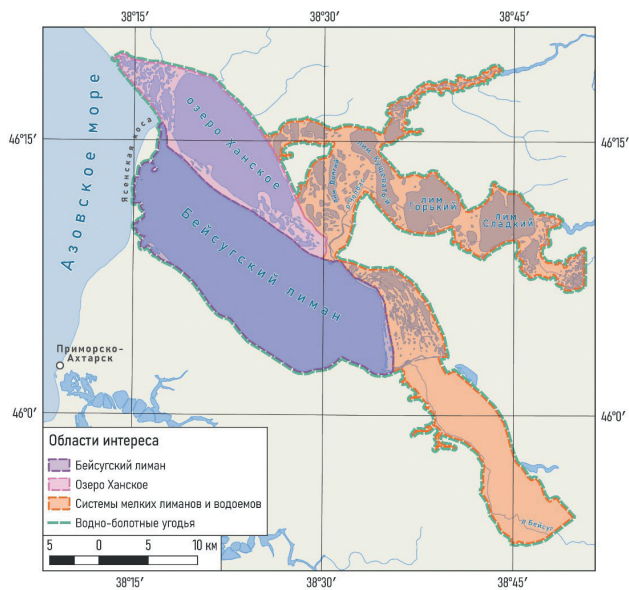


Рис. 1. Водно-болотные угодья Бейсугского лимана и оз. Ханского

был разработан код с помощью редактора кода JavaScript, позволяющий воспользоваться платформой Google Earth Engine API. Однако космические снимки были представлены откалиброванными значениями излучения, которые фиксируются датчиком, и не могут использоваться для проведения каких-либо исследований. В связи с этим проведен расчет спектральной яркости с использованием значений коэффициентов масштабирования, указанных в файле метаданных, по следующей формуле:

$$L_{\lambda} = M_{LA} \times Q_{cal} + A_{LA}$$

где L_{λ} – спектральная яркость; Q_{cal} – откалиброванные значения пикселя стандартного продукта («сырого» космического изображения); M_{LA} – мультипликативный коэффициент масштабирования $RADIANCE_MULT_BAND_x$ (x – конкретный канал) из метаданных; A_{LA} – аддитивный коэффициент масштабирования $RADIANCE_ADD_BAND_x$ (x – конкретный канал) из метаданных [2].

Оценка динамики площади водного зеркала проводилась для исследуемых водоемов с использованием модифицированного нормализованного разностного водного индекса MNDWI (Modified normalized difference water index), который задействует в вычислениях G- и SWIR-каналы и принимает значения от -1 до 1 . В рамках данной задачи были отобраны космические снимки с 1985 по 2023 г. (за исключением 2012 г.) преимуще-

ственно за период летней межени. Упомянутый индекс позволяет создать маску водной поверхности для вычисления площади водного зеркала объекта в соответствии с интересующей областью. Это возможно после проведения реклассификации полученного индексного изображения на водную составляющую путем присвоения всем положительным пикселям растра значения 1 и на неводную – путем присвоения всем отрицательным пикселям растра значения 0 . Расчет площади производился в рамках области интереса путем подсчета всех пикселей, имеющих значение 1 , соответствующее водной поверхности, и умножения полученной суммы на площадь ячейки растра. Всего было рассмотрено 38 комических изображений.

Мерой интенсивности изменений площади водного зеркала изучаемых водоемов за рассматриваемый промежуток времени выступали коэффициенты линейной регрессии (линейного тренда), значимость которых определена путем статистической проверки гипотезы об их равенстве нулю с помощью t -критерия Стьюдента с уровнем значимости 5% .

Метод разностных интегральных кривых использован для выявления периодов повышенной и пониженной водности, а также переломного момента (года), в который произошла смена положительной тенденции изменения площади водной поверхности водоема на отрицательную.

Для выявления долгопериодных изменений выполнен расчет скорости изменения площади водного зеркала водоемов (RC) и индекса стабильности (SG), отражающего долю угодий, которые не перешли в другую категорию землепользования, в соответствии с формулами из работы [3].

Изучение динамики водной растительности обширной зоны водно-болотных угодий, включающих прибрежную зону Бейсугского лимана, оз. Ханское с примыкающей к нему системой лиманов, выполнено с помощью нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI (Normalized difference vegetation index), который задействует в вычислениях R- и NIR-каналы и принимает значения от -1 до 1 . Выбраны космические снимки, датированные весенним, летним и осенним периодом за 1985–2023 гг. (за исключением 2012 г.), что наиболее полно отражает вегетационный период растительности изучаемой территории, отличающейся обилием

теплолюбивых видов (рис. 2). Оценка производилась путем расчета среднего значения NDVI по водно-болотным угодьям с предварительным вычетом маски воды, созданной по ранее описанно-

му принципу с помощью индекса MNDWI. Всего было обработано 94 космических изображения с неравномерным распределением как по сезону, так и по году [5].

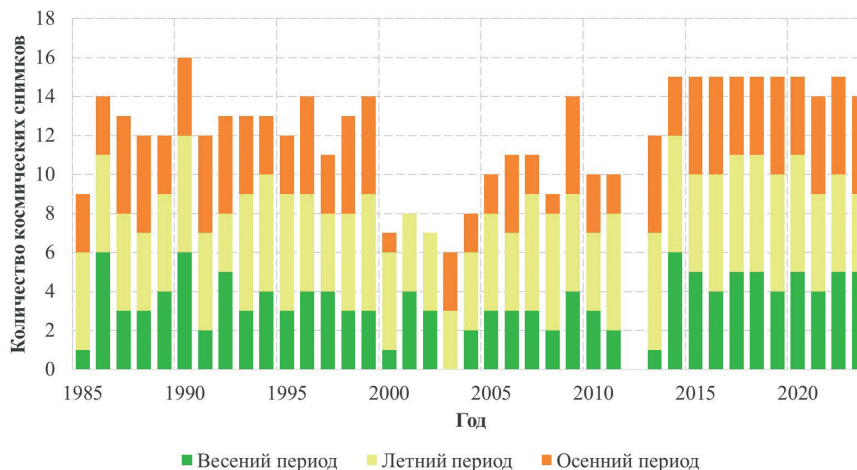


Рис. 2. Обзор фонда космических снимков спутников программы Landsat за 1985–2023 гг.

Результаты и их обсуждение. На территории Восточного Приазовья и в бассейне р. Дон с 2007 г. по настоящее время наблюдается маловодный период, что отражается на характеристиках водоемов.

Количественная оценка пространственно-временной изменчивости площади водной поверхности исследуемых водоемов представлена в таблице 1.

Таблица 1. Статистические характеристики площади Бейсугского лимана, оз. Ханского и системы мелких водоемов за период 1985–2023 гг.

Показатель	Бейсугский лиман	Озеро Ханское	Система мелких водоемов
Площадь в 1985 г. (начальный год), км ²	280,72	114,85	290,39
Средняя площадь, км ²	276,15	99,22	220,58
Минимальная площадь, км ²	269,09	15,40	107,30
Максимальная площадь, км ²	283,65	140,75	337,94
Площадь постоянной водной поверхности, км ²	263,82	0,43	82,39
Коэффициент линейного тренда площади водной поверхности, км ² /10 лет*	-2,06	-19,78	-47,16
Индекс скорости изменения площади водного зеркала водоема (RC), % / 10 лет от начального значения в 1985 г.	-0,73	-17,22	-16,24
Индекс стабильности (SG) за 1985 и 2023 гг., %	95,51	0,42	38,02

*Значения, выделенные жирным шрифтом, являются статистически значимыми.

В период 1985–2023 гг. все рассматриваемые водоемы имеют тенденцию к сокращению размеров, о чем свидетельствуют статистически значимые отрицательные коэффициенты линейного тренда (табл. 1).

Скорость уменьшения площади водного зеркала (RC) была наименьшей у Бейсугского лимана (0,7 %), наибольшей – у оз. Ханского (17,2 %) и системы мелких водоемов (16,2 %) за десятилетие.

На фоне общего уменьшения площади водных объектов определены периоды повышенной (1985–2008 гг.) и пониженной (2009–2023 гг.) водности (рис. 3). Можно отметить схожие тенденции изменения площадей Бейсугского лимана и системы мелких водоемов по годам вплоть до 2009 г. После 2009 г. как для Бейсугского лимана, так и для оз. Ханского с системой мелких лиманов и озер характерен общий тренд уменьше-

ния площади водной поверхности. После этого переломного года водная система оз. Ханского и прилегающих мелких водоемов стала особенно нестабильна, колебания уровня от года к году увеличивались. Рассчитанные индексы стабильности (SG) говорят об относительно устойчивом состоянии Бейсугского лимана (95,5 %) и относительной неустойчивости оз. Ханского (0,42 %) в рассматриваемый период времени (см. табл. 1).

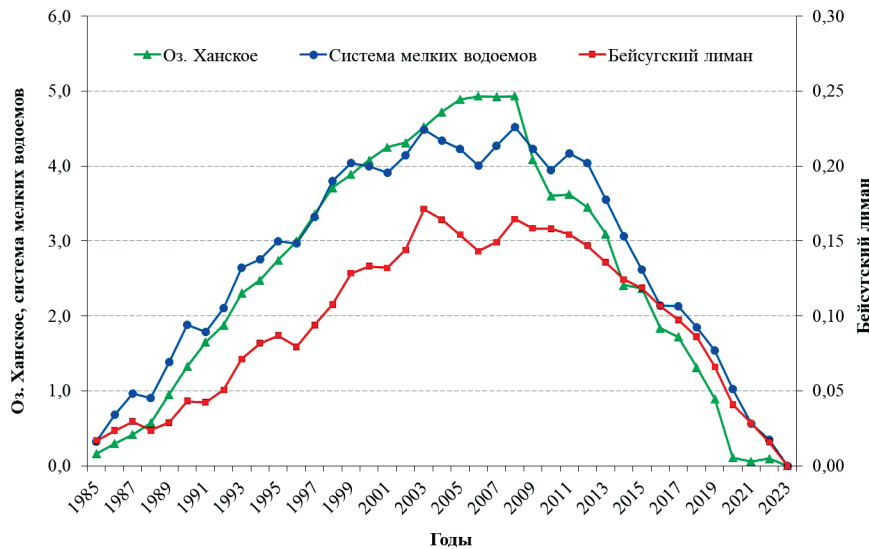


Рис. 3. Нормированные разностные интегральные кривые площадей исследуемых водоемов за 1985–2023 гг.

Анализ многолетних данных позволяет сделать вывод о том, что пик продуктивности доминирующих в исследуемых водно-болотных угодьях тростниковых зарослей зачастую приходится на июнь – июль (150–210-й дни в году) и достигает максимальных значений NDVI интервале 0,55–0,60 (рис. 4). Наибольший вклад

в указанные значения вносят наиболее изменчивые растительные сообщества Бейсугского водохранилища, которые плавно перетекают в болото, в то время как угодья близ крупных водоемов представляют собой не столь обширные по площади зоны, хотя представляют наибольший интерес.

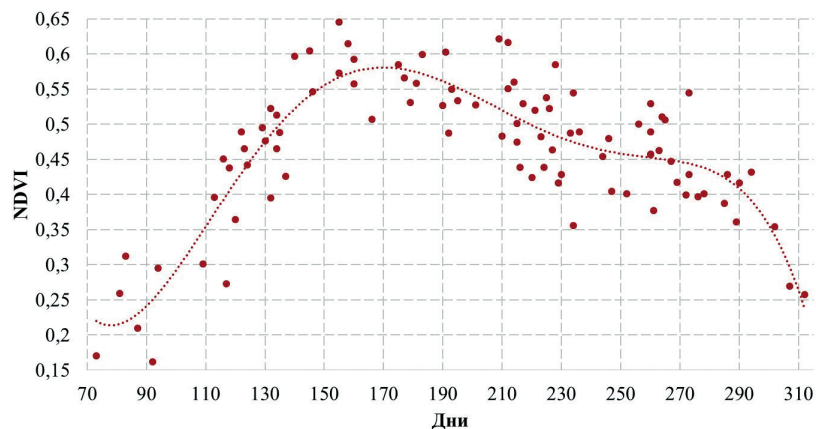


Рис. 4. Характерный сезонный ход значений NDVI за 1985–2023 гг. (линия тренда представлена полиномиальной функцией 5-й степени)

Проведенный статистический анализ помог выявить среди обширного перечня многолетних данных некоторую изменчивость значений NDVI в переходные сезоны (табл. 2). Дело в том, что в мае – апреле и сентябре – октябре значе-

ния NDVI статистически значимо возросли, что предположительно может свидетельствовать об увеличении продолжительности вегетационного периода и требует более детальных исследований.

Таблица 2. Основные статистические показатели анализа сезонных изменений значений NDVI за 1985–2023 гг.

Показатель	Месяц								
	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1985–2008									
Среднее значение	0,21	0,30	0,51	0,56	0,55	0,48	0,44	0,38	0,27
Медианное значение	0,21	0,30	0,50	0,56	0,54	0,49	0,43	0,39	0,27
Минимальное значение	0,17	0,16	0,43	0,51	0,48	0,36	0,40	0,35	0,27
Максимальное значение	0,26	0,44	0,60	0,61	0,62	0,54	0,51	0,40	0,27
2009–2023									
Среднее значение	0,31	0,36	0,45	0,59	0,57	0,49	0,48	0,41	0,26
Медианное значение	0,31	0,36	0,47	0,58	0,55	0,48	0,48	0,41	0,26
Минимальное значение	0,31	0,27	0,39	0,57	0,53	0,42	0,38	0,36	0,26
Максимальное значение	0,31	0,45	0,49	0,65	0,62	0,59	0,54	0,43	0,26

Выводы. В данном исследовании выполнена оценка многолетней изменчивости площади водной поверхности и сезонной динамики растительности водно-болотных угодий Бейсугского лимана и озера Ханского с помощью оптических спутниковых снимков Landsat с помощью широко используемого метода классификации на основе многоканальных спектральных индексов (MNDWI и NDVI) в отсутствие облачности.

В период 1985–2023 гг. отмечена общая тенденция сокращения площадей рассматриваемых водных объектов, о чем свидетельствуют статистически значимые отрицательные коэффициенты линейного тренда. Однако на фоне общего

уменьшения площадей водных объектов можно выделить периоды повышенной (1985–2008 гг.) и пониженной (2009–2023 гг.) водности. Состояние Бейсугского лимана можно охарактеризовать как устойчивое, а состояние оз. Ханского и прилегающих мелких водоемов – как нестабильное. Колебания площадей водной поверхности последних увеличились в период 2009–2023 гг.

Показана сезонная и многолетняя динамика NDVI растительности на исследуемой территории. Отмечена тенденция увеличения значений NDVI после 2009 г., а также в переходные сезоны (май – апрель, сентябрь – октябрь).

Публикация подготовлена в рамках реализации ГЗ ЮНЦ РАН, № госрегистрации проекта 122103100027-3.

Список литературы

1. Bai J., Cui B., Cao H., Li A., Zhang B. Wetland degradation and ecological restoration // The Scientific World Journal. 2013. P. 1–2. <https://doi.org/10.1155/2013/523632>.
2. The United States Geological Survey (USGS). URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product> (дата обращения: 22.07.2024).
3. Швердяев И.В., Сорокина В.В., Солтан А.А., Парфенова А.В. Анализ долгосрочных изменений площадей водных

объектов в долине Западного Маныча на основе данных дистанционного зондирования // Наука Юга России. 2024. Т. 20. № 1. С. 21–31. DOI: 10.7868/25000640240104.

4. Xiu L., Yan C., Li X., Qian D., Feng K. Changes in wetlands and surrounding land cover in a desert area under the influences of human and climatic factors: a case study of the Hongjian Nur region // Ecological Indicators. 2019. 101. P. 261–273. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.025>.

**ASSESSMENT OF CHANGES IN WETLANDS
OF THE BEYSUGSKIY LIMAN
AND LAKE KHANSKOYE USING RSD AND GIS**

V.S. Tsybulina¹, I.V. Sheverdyayev², V.V. Sorokina²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow

²Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don
tsybulina.veronika@mail.ru; ig71089@yandex.ru

Abstract. The wetlands of the Beysugskiy Liman and Lake Khanskoye play a significant role in the hydrological balance of the Sea of Azov, contribute to the stability of its existing ecosystem, and also play an important role in maintaining biodiversity. Monitoring and forecasting their condition is of great importance in both environmental and climatic aspects.

This study assessed the areas of the water surface and near-water vegetation of the Beysugskiy Liman and Lake Khanskoye (with a system of smaller waterbodies) from 1985 to 2023 using Landsat optical satellite images provided by the Google Earth Engine (GEE) platform. The images were interpreted using the classification method based on multi-band spectral indices (MNDWI and NDVI) in the absence of clouds.

In the period 1985–2023, a general trend towards a decrease in the areas of the water bodies under consideration was noted, as evidenced by statistically significant negative linear trend coefficients. The intensity of the decrease in the area of the water surface was the lowest at the Beysugskiy Liman (0.7 %), the highest – at Lake Khanskoye (17.2 %) and the system of small waterbodies (16.2 %) over the decade. However, against the background of the general decrease in the areas of water bodies, periods of increased (1985–2008) and decreased (2009–2023) water content can be distinguished. Seasonal and long-term dynamics of NDVI of vegetation in the study area are shown. A tendency towards an increase in NDVI values after 2009, as well as in transitional seasons (May – April, September – October) is noted.

Keywords: Landsat, MNDWI, NDVI, wetlands, Beysugskiy Liman, Lake Khanskoye.

References

1. Bai J., Cui B., Cao H., Li A., Zhang B. 2013. Wetland degradation and ecological restoration. *The Scientific World Journal*. P. 1–2. <https://doi.org/10.1155/2013/523632>.
2. Sheverdyayev I.V., Sorokina V.V., Soltan A.A., Parfenova A.V. 2024. [Analysis of long-term variations of waterbodies areas in the Western Manych Valley using remote sensing data]. *Nauka Yuga Rossii*. 20(1): 21–31. DOI: 10.7868/25000640240104. (In Russian).
3. The United States Geological Survey (USGS). URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product> (accessed 7 July 2024).
4. Xiu L., Yan C., Li X., Qian D., Feng K. 2019. Changes in wetlands and surrounding land cover in a desert area under the influences of human and climatic factors: a case study of the Hongjian Nur region. *Ecological Indicators*. 101: 261–273. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.025>.