ТЕХНОЛОГИЯ РАСЧЁТА ПЛОЩАДИ ВОДНОГО ЗЕРКАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ С ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ СЕРИИ SENTINEL-2, И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОЩАДЕЙ СОЛЕННЫХ ОЗЕР КРЫМА

Р.В. Боровская, С.С. Смирнов

Азово-Черноморский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АзНИИРХ»),
РФ, г. Керчь, ул. Свердлова 2
E-mail: borovskaya_r_v@azniirkh.ru

Рассмотрен один из вариантов решения задачи детектирования водных объектов и определения их площади на основе данных со спутников серии «Sentinel-2», обработанных с помощью программного обеспечения SNAP. По материалам спутникового мониторинга выполнены исследования площади зеркала 14 гипергалинных озёр Крыма, большинство из которых относятся к категории рыбохозяйственного значения. В результате было установлено, что наибольшие сезонные изменения претерпевала площадь зеркала оз. Малое Ялы-Майнаское Евпаторийской группы, оз. Акташское и Киркояшское Керченской группы; наименьшие – оз. Кирлеутское и Круглое Перекопской группы, оз. Ярылгач Тарханкутской группы, оз. Ойбурское и Мойнаское Евпаторийской группы. Среднегодовое значение показателей исследуемых площадей относительно показателей 2004 г. были ниже, за исключением оз. Ярылгач. Наибольшие отклонения в сторону уменьшения прослеживались в оз. Акташское.

Ключевые слова: методика расчета, дистанционное зондирование, детектирование водных объектов, площадь зеркала, спутниковый мониторинг, гипергалинные озера Крыма, рыбохозяйственное значение озёр.

Поступила в редакцию: 13.04.2020.

Введение. Одной из распространённых задач при обработке данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является детектирование водных объектов и определение их площади. В статье рассмотрен вариант решения этой задачи на основе данных со спутников серии Sentinel-2, обработанных с помощью программного обеспечения SNAP, принадлежащих Европейскому космическому агентству и доступных после базовой обработки на специализированном Интернет – портале Copernicus Open Access Hub [1]. Эти данные представляют собой наборы файлов в ZIP – контейнере, состоящие из серии геопривязанных растровых изображений в различных диапазонах спектра электромагнитного излучения (мультиспектральные снимки) и сопроводительной информации.

Основные преимущества данных, полученных с ИСЗ серии Sentinel-2: бесплатный доступ, относительно высокое разрешение (10 метров на пиксель для видимого диапазона), наличие спе-

циализированного бесплатного программного обеспечения для обработки и анализа – SNAP [2].

Описанная ниже методика расчёта площади водного зеркала была реализована с помощью ПО SNAP v 7.0.

Методика расчета. Для определения водных объектов на мультиспектральных спутниковых снимках был применён индекс MNDWI, использующий данные зелёного диапазона видимого спектра (для Sentinel-2 обозначен как B3) и средневолнового ИК-диапазона (Middle Infrared – MIF, для Sentinel-2 обозначен как B12).

Модифицированный стандартизованный индекс различий воды (Modified Normalized Difference Water Index – MNDWI) был описан Hanqiu Xu в 2006 году [3]. Использование данного индекса позволяет достаточно эффективно выявлять водные объекты на мультиспектральных снимках. Индекс рассчитывается по формуле

$$MNDWI = (Green - MIR) / (Green + MIR),$$

где Green и MIR – значения пикселей растра (отражательная способность) зеленого диапазона и средневолнового инфракрасного диапазона соответственно.

Значения индекса могут находиться в пределах от минус 1 до 1, где минус 1 с максимальной вероятностью соответствует суше, а 1 – водной поверхности. Однако, перед расчётом индекса MNDWI требуется предварительная обработка полученного мультиспектрального снимка, поскольку растры зелёного

и средневолнового ИК – диапазонов имеют разное разрешение: 10 и 20 метров на пиксель соответственно. Поэтому необходимо выполнить интерполяцию для растра B12 (он же средневолновой ИК или MIF). В SNAP эта процедура доступна через главное меню: Raster – Geometric Operations – Resampling. Далее в появившемся окне следует выбрать в качестве эталонного растра любой из RGB – набора (B02, B03 или B04 – у них одинаковое разрешение и размер), а в качестве метода повышающей дискретизации (upsampling) рекомендуется указать билинейную интерполяцию (рис. 1).

Рис. 1. Выбор параметров передискретизации в SNAP
Fig. 1. Selection of rate conversion objectives at SNAP

Также доступна интерполяция методом ближайшего соседа и бикубическая интерполяция, но эмпирически для рассматриваемой задачи наилучших результатов с минимумом артефактов удалось добиться при использовании билинейной интерполяции. После выполнения передискретизации (resampling) можно выполнять расчёт индекса MNDWI. Его расположение в главном меню SNAP:

Optical – Thematic Land Processing – Water Radiometric Indices - MNDWI Processor. Все промежуточные результаты расчётов сохраняются программой SNAP в виде так называемых «продуктов» (product) в формате DIM (рис. 2).

Далее, на основе растра со значениями индекса MNDWI следует выполнить детектирование водных объектов. Оно выполняется с помощью бинаризации

растра по критерию превышения порогового значения индекса. В качестве величины порогового значения было

взято 0,18 на основании рекомендаций [4], что также хорошо согласуется с эмпирически полученными результатами.

Рис. 2. Окно Product Explorer, в котором отображены: 1 – исходные данные, 2 – данные после передискретизации, 3 – данные после передискретизации и расчёта MNDWI

Fig. 2. Dialogue box Product Explorer where there are reflected: 1 – primary data, 2 – data after rate conversion, 3 – data after rate conversion and MNDWI calculation

Для этого в контекстном меню раstra MNDWI необходимо открыть пункт Band Math и ввести в поле Band math expression следующее выражение: `if mndwi > 0.18 then 0 else 1`. Результаты

бинаризации раstra MNDWI представлены на рис. 3, наряду с цветным изображением в видимом диапазоне (RGB) и растром MNDWI.

Рис. 3. Результаты обработки снимка Sentinel-2A (оз. Кирлеутское): изображение в видимом диапазоне (RGB), растр индекса MNDWI, бинаризованный растр (вода/суша)

Fig. 3. Results of Sentinel-2A snapshot processing (The Kirlaut Lake): snapshot at visual wavelength (RGB), raster of MNDWI index, binarized raster (water/mainland)

В качестве примера приведено озеро Кирлеутское (дата съёмки 09.10.2019).

После детектирования водных объектов можно переходить к определению

их площади. Для этого следует обозначить интересующий водный объект с помощью полигональной векторной маски (рис. 4).

Рис. 4. Полигональная векторная маска (mask – 1) для озера Кирлеутское; справа отображен диспетчер слоёв, в котором созданный векторный слой помечен как маска (слой mask – 1 включен в разделе Masks)

Fig. 4. Polygonal vector mask (mask – 1) for The Kirlut Lake; on the right there is the dispatcher of layers where created vector layer is marked as mask (mask –1 layer is included to the Masks section)

Маску можно создать как с помощью SNAP, используя Polygon drawing tool в главном меню, так и с помощью другого программного обеспечения (например, QGIS) и затем импортировать в проект SNAP. Основные требования к векторной маске – она должна полностью перекрывать водное зеркало целевого объекта и не затрагивать другие водные объекты. Теперь необходимо определить количество пикселей, соответствующих водной поверхности, в пределах созданной маски. Для этого нужно выделить бинаризованный растр (в рассматриваемом случае – mndwi-bin) в окне Product Explorer и выбрать в главном меню

Snap пункт Analysis – Histogram (рис. 5). Далее требуется выделить пункт Use ROI mask, выбрать в выпадающем списке созданную маску и построить гистограмму, после чего навести курсор на столбец «ноль», соответствующий водной поверхности, – появится всплывающая подсказка с указанием числа пикселей данной категории (рис. 6). В правой части окна гистограммы отображается селектор использования маски «Use ROI mask» (ROI – Region of Interest) и список доступных масок. Можно также использовать функцию приближения (zoom), чтобы узнать число пикселей по обозначениям на оси ординат (рис. 7).

Рис. 5. Построение гистограммы для бинаризованного растра
 Fig. 5. Patterning of the bar graph for the binarized raster

Рис. 6. Использование всплывающей подсказки (отображается при наведении курсора на столбец гистограммы) для определения количества пикселей в категории «вода»
 Fig. 6. Use of the pop-up hint (is reflecting upon hovering over the bar chart column) for determination of pixel quantity in the “water” category

Рис. 7. Использование функции приближения (zoom) для определения количества пикселей в категории «вода» на оси ординат (доступна также всплывающая подсказка при наведении курсора на столбец гистограммы)

Fig. 7. Use of zoom function for determination of pixel quantity in the “water” category on the ordinate axis (pop-up hint is also available upon hovering over the bar chart column)

В приведённом выше примере число пикселей, соответствующих водной поверхности, составляет 199269. Зная разрешение бинаризованного раstra, а оно равно разрешению раstra MNDWI (10 метров на пиксель, т.е. 1 пиксель – 100 м² или 0,0001 км²), определяем площадь водного зеркала Кирлеутского озера: $199269 \cdot 0,0001 = 19,9269 \text{ км}^2$.

Результаты. Используя изложенную выше методику, исследованы площади 14 гипергалинных озёр Крыма. Это 6 озёр Евпаторийской группы [5] (Ойбурское, Аджигайчское, Солёное у п. Молочное, Мойнакское, Большое Ялы-Майнакское и Малое Ялы-Майнакское); 2 озера Тарханкутской группы (Ярылгач и Джарылгач); 3 озера Перекопской группы (Айгульское, Кирлеутское и Круглое); 3 озера Керченской группы (Акташское, Тобечикское и Киркояшское).

Площадь зеркала озёр на современном этапе сравнивались с соответствующими

величинами справочника 2004 г., принятыми условно за нормы.

Наиболее стабильные величины площадей отмечались в озёрах Евпаторийской группы. Наименьшие отклонения от нормы (на 4–8%) отмечались в озёрах Ойбурское, Мойнакское и Большое Ялы – Майнакское, наибольшие – оз. Малое Ялы – Майнакское (43% весной – 82% осенью).

Площади зеркала озёр Перекопской группы имели разнонаправленные тенденции. Площадь зеркала Айгульского и Кирлеутского озёр была меньше 2004 г. Минимальные отклонения прослеживались в 2015–2017 гг., за исключением осени 2017 г., когда наблюдалось наибольшее понижение уровня воды и минимальное значение площади этих озёр соответственно 77,63 и 93,27% от нормы. Площадь озера Круглое определялась в 2019 г. и в течение трех сезонов

(весна, лето, осень) на 2,4–3,4% превышала норму.

Больших колебаний как сезонных, так и относительно 2004 г., претерпевали озера Керченской группы. Наибольшая площадь зеркала оз. Акташское прослеживалась в раннелетний сезон 2016 г., а также весной и летом 2019 г. Однако даже при максимальных показателях площадь зеркала относительно нормы составляла 38–55%. Наибольшая площадь зеркала (88% от нормы) оз. Тобечик, исследуемого в 2017 – 2018 гг., наблюдалась весной 2018 г. В летне – осенний сезон 2017 г. озеро практически полностью пересыхало.

Озера Тарханкутской группы в целом имеют незначительные колебания площадей. Площадь оз. Ярылгач во все наблюдаемые сезоны 2017 – 2019 гг. на 103–115% превышала норму. Площадь оз. Джарылгач в 2017 г. на 0,3–4% была выше, а в 2018 г. и 2019 г. на 2,5–6% и 1–9% соответственно была ниже нормы.

Среднемноголетние показатели наблюдаемых площадей во всех озерах были ниже площадей 2004 г., за исключением оз. Ярылгач (109%). Наибольшие отклонения в сторону уменьшения отмечались в оз. Акташское и составляли 24% площади 2004 г. (табл.).

Таблица. Среднемноголетние показатели площади зеркала крымских озер и отклонения от 2014 г.

Озеро	Количество лет	Площадь зеркала, км ² [5]	Площадь озера, км ² / % (относительно 2004 г.)			
			весна	лето	осень	год
Евпаторийская группа озер						
Ойбурское	5	5,0	4,71/94	4,67/93	4,67/93	4,68/93
Аджибайчикское	3	1,2	0,78/65	0,77/64	0,75/63	0,77/64
Соленое у п. Молочное	3	1,9	1,42/75	1,36/72	1,35/71	1,38/73
Мойнакское	2	1,76	1,70/97	1,68/96	1,68/96	1,69/96
Большое Ялы-Майнакское	1	0,6	0,58/97	0,56/93	0,53/88	0,56/93
Малое Ялы-Майнакское	1	0,1	0,04/43	0,05/53	0,08/82	0,06/59
Тарханкутская группа озер						
Ярылгач	3	1,6	1,76/110	1,75/109	1,72/108	1,74/109
Джарылгач	3	8,3	8,21/99	8,10/98	8,07/97	8,13/98
Перекопская группа озер						
Айгульское	5	37,5	34,94/93	35,02/93	32,27/86	34,08/91
Кирлеутское	5	20,8	20,25/97	20,28/98	19,98/96	20,17/97
Круглое	1	2,55	2,62/103	2,63/103	2,61/102	2,62/103
Керченская группа озер						
Акташское	5	26,8	7,46/28	6,87/26	4,75/18	6,36/24
Тобечикское	2	18,7	14,45/77	11,82/63	13,39/72	13,22/71
Киркояшское	1	0,6	0,55/92	0,53/88	0,41/68	0,499/83

Заключение. Большинство гипергалинных озер Крымского полуострова относятся к водоемам категории рыбохозяйственного значения. Запасы водных беспозвоночных, обитающих в этих озерах, рассчитываются с применением метода площадного учета. В настоящее время искусственные спутники Земли

(ИСЗ) являются основным источником регулярных наблюдений водной поверхности. К основным преимуществам данных, получаемых с ИСЗ серии Sentinel – 2, относятся: бесплатный доступ, относительно высокое разрешение (10 м на пиксель для видимого диапазона), наличие специализированного бесплатного

программного обеспечения для обработки и анализа – SNAP. При обработке данных дистанционного зондирования Земли одной из распространённых задач является детектирование водных объектов и определение их площади. В статье рассмотрен вариант решения этой задачи, проведен расчет площадей зеркала 14 озер Крыма, для 10 из них определены среднесезонные показатели, а также проведен сравнительный анализ площадей озер на современном этапе и согласно справочнику 2004 г.

Среднесезонные показатели площадей озер были ниже по сравнению с показателями 2004 г., за исключением оз. Ярылгач. Наибольшие отклонения в сторону уменьшения прослеживались в оз. Акташское.

Максимальные сезонные изменения претерпевала площадь зеркала оз. Малое Ялы-Майнакское Евпаторийской группы, оз. Акташское и Киркояшское Керченской группы; наименьшие – оз. Кирлеутское и Круглое Перекопской группы, оз. Ярылгач Тарханкутской группы, оз. Ойбурское и Мойнакское Евпаторийской группы.

Изложенная методика, а также результаты величин площадей гипергалинных озер Крыма, полученные при

использовании данной методики, имеют большое практическое значение для расчета и корректировки величины запаса водных биологических ресурсов, обитающих в этих водоемах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://scihub.copernicus.eu/> / (дата обращения 19.02.2020).
2. <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/> / (дата обращения 19.02.2020)
3. *Hanqiu Xu*. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // *International Journal of Remote Sensing*. 2006. Vol. 27, issue 14. P. 3025–3033.
4. *Катаев М.Ю., Бекеров А.А.* Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям // *Доклады ТУСУРа*. 2017. Т. 20, № 4. С. 105–108.
5. *Лисовский А.А.* Поверхностные водные объекты Крыма (Справочник) / А.А. Лисовский, В.А. Новик, З.В. Тимченко [и др.] / под ред. к.г.н. Тимченко З.В. // Симферополь: Рескомводхоз АРК. 2004. С. 30–36.

TECHNOLOGY OF WATER SURFACE AREA CALCULATION USING DATA RECEIVED FROM ARTIFICIAL SATELLITE OF SENTINEL-2 SERIES, ITS IMPLEMENTATION FOR DETERMINATION OF THE SURFACE AREAS OF THE CRIMEAN SALINE LAKES

R.V. Borovskaya, S.S. Smirnov

Azov-Black Sea Branch of the FSBSI «VNIRO» («AzNIIRKH»), RF, Kerch, Sverdlov St., 2

One of the methods for performing the task of water bodies' detection and determination of their surface area using data received from satellites of Sentinel-2 series and processed with SNAP software is considered. According to the data received from the satellite monitoring, the surface area of 14 hyperhaline Crimean lakes most of which belong to a category of fisheries importance signification was investigated. As a result it was found out that the square area of Small Yaly-Maynak Lake of Yevpatoria group, Aqtas Lake and Kirkoyashskoye Lake of Kerch Group underwent the greatest seasonal changes while that of Kirleut Lake and Krugloyy Lake (Adaman Lake) of Perekop Group, Yarylgach Lake of Tarkhankut Group as well as Oybursk Lake and Moyanki Lake of Yevpatoria group were shown to undergo the least changes. Long-term average annual values of the surface areas under investigation compared to ones of 2004 were lower with the exception of Yarylgach Lake. The greatest deviation towards a decrease was observed for Aqtas Lake.

Keywords: method of calculation, remote sensing, detection of water bodies, square of water surface, satellite monitoring, hyperhaline Crimean lakes, lake fisheries importance signification.