

Д. Н. Ондасынова^{1✉}, Е. П. Парфенова¹

Гибридный метод выделения водных объектов на основе мультиспектральных данных Sentinel-2

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: ondasynovadaana@mail.ru

Аннотация. В данной работе представлен гибридный метод спектральной фильтрации с сезонной адаптацией порогов для идентификации водных объектов на мультиспектральных данных Sentinel-2. Предлагаемый метод комбинирует несколько спектральных индексов, учитывая различия в отражательной способности воды, растительности и поверхностей в тени или на ярком свете. Для повышения надежности обнаружения используется механизм корректировки порогового значения в зависимости от сезона и условий освещенности, что позволяет корректно идентифицировать границы водных объектов при изменении уровня воды и различной яркости фона. Разработанный алгоритм реализован в среде ArcGIS Pro и протестирован на снимках разных времен года, включая летние, весенние и осенние периоды, характеризующиеся высокой изменчивостью спектральных характеристик. Анализ показывает, что гибридный метод спектральной фильтрации существенно снижает влияние теней и бликов, типичных для урбанизированных территорий, а также позволяет более точно идентифицировать водные объекты. Полученные результаты подтверждают практическую значимость разработанного метода и его потенциал для применения в исследованиях динамики водных объектов.

Ключевые слова: водные объекты, гибридный алгоритм, мультиспектральный анализ, тени, блики, Sentinel-2

D. N. Ondasynova^{1✉}, E. P. Parfenova¹

Hybrid method for identifying water bodies based on multispectral Sentinel-2 data

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: ondasynovadaana@mail.ru

Abstract. This paper presents a hybrid spectral filtering method with seasonal threshold adaptation for identifying water bodies in Sentinel-2 multispectral data. The proposed method combines several spectral indices, taking into account differences in the reflectance of water, vegetation, and surfaces in shadow or bright light. To improve detection reliability, a mechanism is used to adjust the threshold value depending on the season and lighting conditions, which allows for the correct identification of water body boundaries when water levels change and background brightness varies. The developed algorithm is implemented in ArcGIS Pro and tested on images from different seasons, including summer, spring, and autumn, which are characterized by high variability in spectral characteristics. The analysis shows that the hybrid spectral filtering method significantly reduces the influence of shadows and glare typical of urbanized areas and allows for more accurate identification of water bodies. The results confirm the practical significance of the developed method and its potential for use in studies of water body dynamics.

Keywords: water bodies, hybrid algorithm, multispectral analysis, shadows, glare, Sentinel-2

Введение

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) играют важную роль в мониторинге окружающей среды, а также в управлении водными и природными ресурсами. Одним из важнейших направлений анализа ДЗЗ является оценка состояния гидрологических сетей, выявление водных объектов, позволяющее контролировать динамику водного баланса и паводковой обстановки.

Спектральные индексы – один из самых популярных инструментов обнаружения воды. Однако их использование сопряжено с рядом сложностей: тени от застройки, блики и сезонные изменения освещенности могут привести к путанице между категориями «вода» и «тень», что снижает точность результатов классификации. Поэтому крайне важна разработка более надежных методов обнаружения водной поверхности, учитывающих спектральные и сезонные характеристики изображений.

Цель данного исследования заключается в создании метода гибридной спектральной фильтрации, основанного на интеграции нескольких индексов и системе логических масок для последовательного исключения теней и ярких объектов, на примере участка реки Иртыш вблизи города Семей, Республики Казахстан.

Методы и материалы

Для исследования водных объектов на участке реки Иртыш в районе города Семей были использованы многоспектральные спутниковые данные Sentinel-2, охватывающие многолетний период наблюдений. В данной работе представлены результаты за 2025 год, как наиболее показательные для сравнительного анализа.

Основная цель данного исследования – точно идентифицировать водные поверхности на изображениях разных сезонов, принимая во внимание сложный спектральный фон, такой как урбанизированные территории, асфальтированные участки и тени.

В предыдущем исследовании [1] для сегментации водных объектов использовался нормализованный относительный индекс растительности (NDVI), что позволило оценить пространственно-временную динамику реки Иртыш. В настоящем исследовании этот подход расширен за счет использования гибридного водного индекса, который последовательно отфильтровывает пиксели, искаженные тенями и бликами, что повышает точность определения водной поверхности.

Для создания алгоритма выделения воды и снижения спектральных помех были выбраны четыре основных канала [2]:

- зеленый канал B3;
- красный канал B4;
- ближний инфракрасный канал B8;
- средний инфракрасный канал B11.

Гибридный индекс объединяет принципы NDWI и NDVI и имеет две спектральные компоненты: первая усиливает различие между водными поверхностями и рас-

тельностью, а вторая подавляет влияние почвы и искусственных покрытий [3, 4].

Формула расчета гибридного индекса:

$$HYB_WATER = \frac{\left(\frac{B3 - B8}{B3 + B8}\right) - \left(\frac{B8 - B4}{B8 + B4}\right)}{2}, \quad (1)$$

где $B3$, $B4$, $B8$ – отражательная способность в зеленом, красном и ближнем ИК-диапазонах соответственно.

На основе гибридного индекса формируется исходная бинарная маска водных объектов [5]:

$$WATER = Con\left((HYB_WATER > t_{HYB}) \& \left(\frac{B11}{10000} < t_{sw}^w\right), 1, 0\right), \quad (2)$$

где t_{HYB} – пороговое значение по гибриднему индексу; t_{sw}^w – пороговое значение для коротковолнового ИК-канала B11.

Маска теневых пикселей, позволяющая исключить участки с низкой освещенностью, которые могут ошибочно попасть в воду [6]:

$$SHADOW = Con\left(\left(\frac{B3}{10000} < t_g^{sh}\right) \& \left(\frac{B11}{10000} < t_{sw}^{sh}\right), 1, 0\right), \quad (3)$$

где t_g^{sh} – пороговое значение для зеленого канала B3; t_{sw}^{sh} – пороговое значение для коротковолнового ИК канала B11.

Маска ярких объектов, выделяющая поверхности с высокой отражательной способностью для исключения искусственных покрытий из водных пикселей [7]:

$$BRIGHT = Con\left(\left(\frac{B3}{10000} < t_g^{br}\right) \& \left(\frac{B8}{10000} < t_n^{br}\right), 1, 0\right), \quad (4)$$

где t_g^{br} – пороговое значение для зеленого канала B3; t_n^{br} – пороговое значение для ближнего инфракрасного канала B8.

Маска кандидатов, сохраняющая водные пиксели, частично перекрытые яркими объектами:

$$CANDIDATE = Con((WATER = 1) \& (BRIGHT = 1), 1, 0), \quad (5)$$

Финальная водная маска, которая объединяет точные пиксели воды и исключает тени и яркие поверхности:

$$MASK = (WATER = 1, CANDIDATE = 1) \& (SHADOW = 0) \& (BRIGHT = 0). \quad (6)$$

Пороговое значение в формуле определяется с учетом сезонных изменений уровня воды, растительности, спектральных характеристик фоновой поверхности, а также наличия освещенности, тени или ярких элементов [8]. Анализ гистограмм соответствующих каналов и гибридного индекса позволяет объективно подобрать оптимальное пороговое значение для каждого сезона (рис. 1). Такая модификация позволяет корректно идентифицировать водные объекты на мультиспектральных снимках в разные сезоны года.

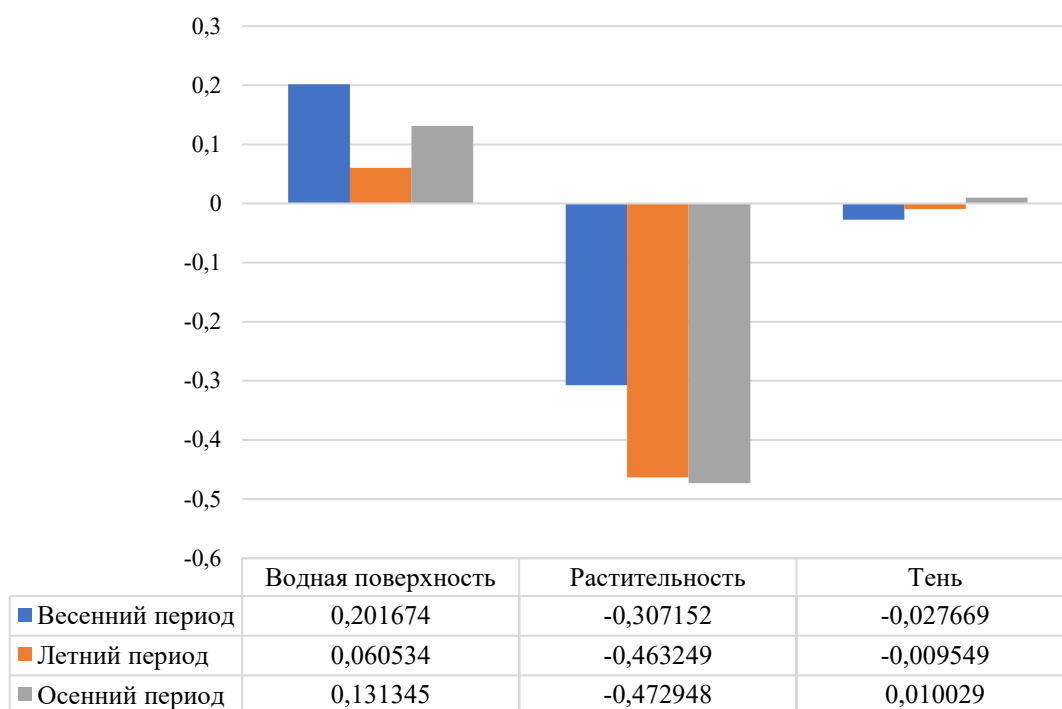


Рис. 1. Пороговые значения гибридного индекса для разных типов поверхностей в весенний, летний и осенний периоды

Результаты

Использование гибридного водного индекса позволяет надежно распознать водную поверхность исследуемой территории, включая основные русла, малые притоки и озера. Исходная маска водной поверхности демонстрирует высокую степень соответствия визуально определяемым границам водных объектов.

Первичная классификация охватывает более 95% открытой водной поверхности. Небольшие ложные срабатывания наблюдаются на участках с густой растительностью и глубокой тенью, где спектральные характеристики частично перекрываются с водой (рис. 2, а).

Для улучшения результатов последовательно применялись три корректирующие маски:

- маска тени (рис. 2, б) удаляет темные области, связанные с рельефными впадинами и густыми лесами. Эта маска снижает долю ложных пикселей воды на 12-15%;

- маска ярких объектов (рис. 2, в) удаляет сильно отражающие поверхности (крыши, дороги, бетонные площадки) и повышает точность классификации в условиях урбанизации;
- маска пересечения ярких объектов с водой (рис. 2, г) точно сохраняет пиксели воды, частично перекрытые мостами и дорогами.

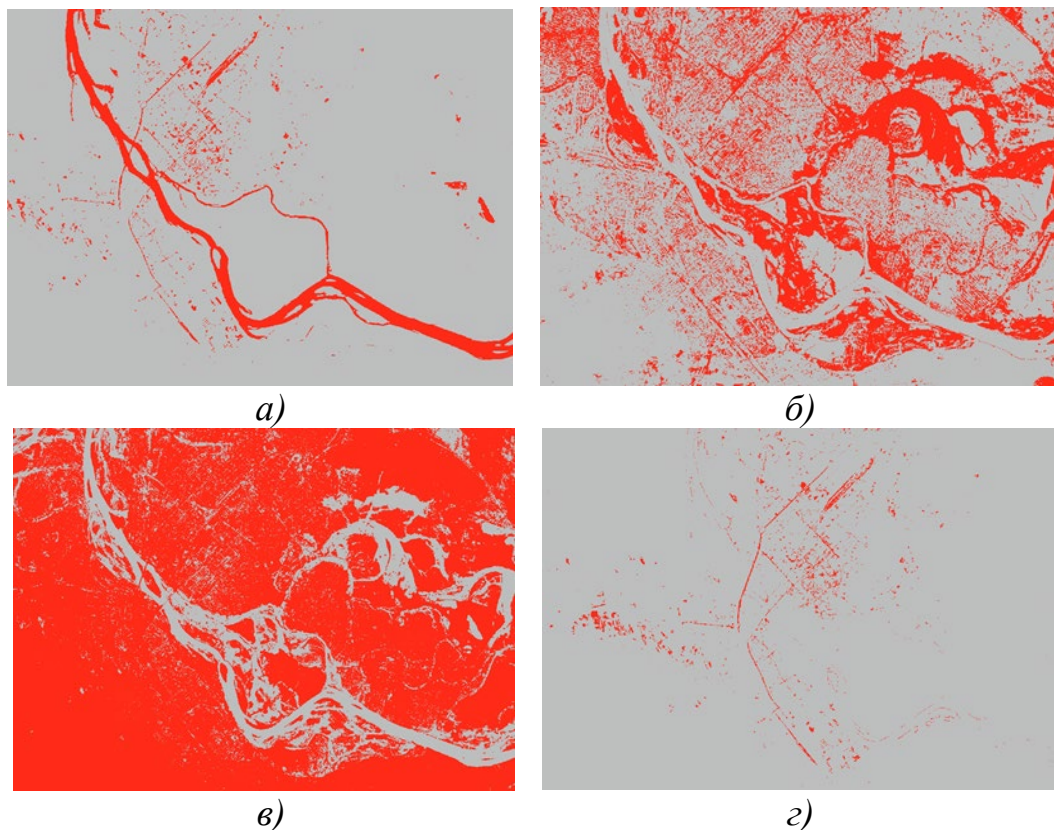


Рис. 2. Последовательность классификации водных объектов на основе гибридного индекса:

- а) исходная маска воды; б) исключение теневых участков;
в) исключение ярких объектов; г) корректировка пересекающихся пикселей

Финальная маска объединяет точные пиксели воды и отсеивает теневые и яркие участки. Сравнение финальной маски с исходным изображением показывает высокую точность и соответствие фактическим границам водных объектов (рис. 3, а, б).

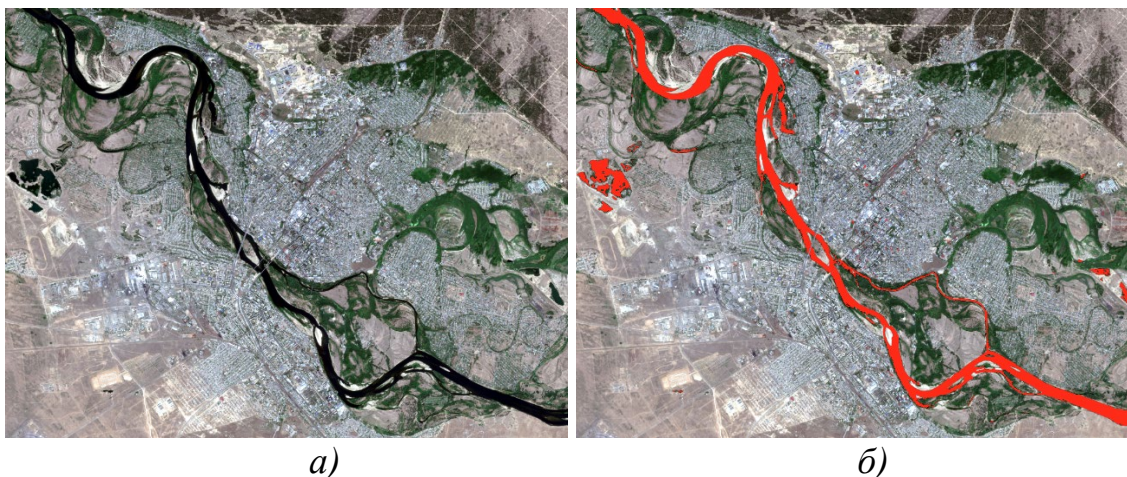


Рис. 3. Результаты выделения водных объектов: а) исходное спутниковое изображение участка реки; б) финальная маска водных объектов, наложенная на спутниковое изображение

Результаты анализа показывают, что последовательная фильтрация темных и ярких объектов снижает ошибки классификации и позволяет надежно идентифицировать водную поверхность независимо от уровня освещенности, типа растительного покрова и состояния поверхности грунта. Визуальное сопоставление масок устойчиво различает воду и сушу, а гибридный индекс позволяет точно идентифицировать водные объекты даже в сложных городских условиях (рис. 4).

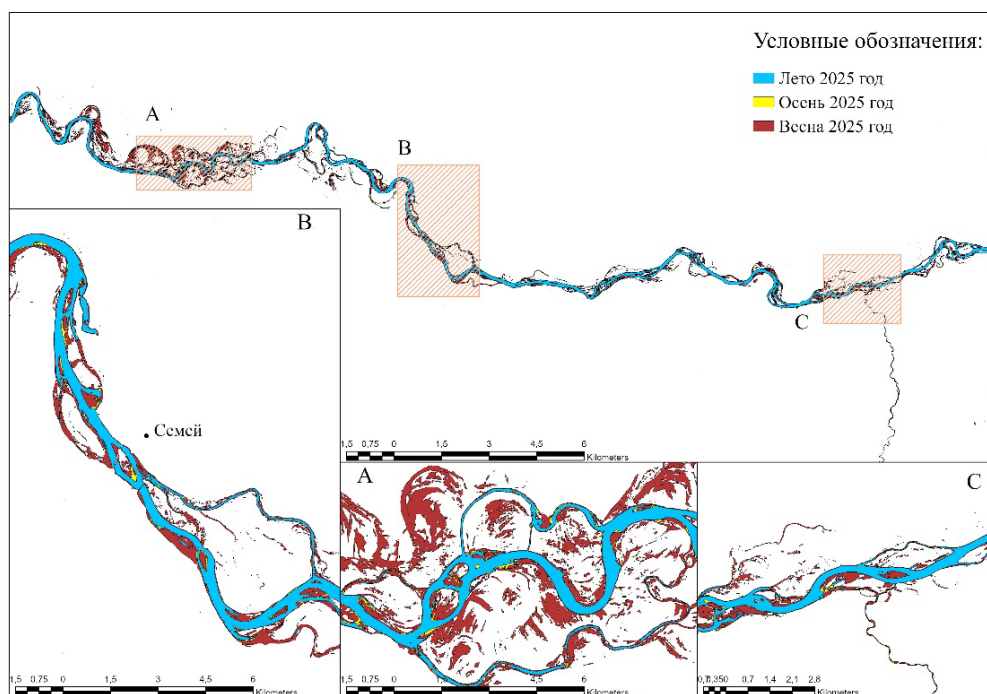


Рис. 4. Векторное представление водных объектов реки Иртыш, отражающее сезонные изменения за 2025 год по данным Sentinel-2

Обсуждение

Результаты показывают, что использование гибридного индекса воды в сочетании с последовательной фильтрацией теневых и ярких участков позволяет последовательно и точно идентифицировать водные поверхности на многоспектральных изображениях Sentinel-2 [9].

Использование дополнительных масок снижает вероятность ошибок классификации и улучшает согласованность границ водных объектов. Удаление теневых пикселей предотвращает ошибочную классификацию участков с густой растительностью и рельефными впадинами, а фильтрация ярких поверхностей устраняет влияние антропогенных объектов [10].

В целом предложенный метод демонстрирует высокую стабильность и воспроизводимость, что позволяет надежно формировать итоговые маски для последующего количественного анализа, мониторинга речных сетей и оценки состояния водных ресурсов.

Заключение

В данной работе представлен системный подход к идентификации водных объектов на основе многоспектральных изображений Sentinel-2 с использованием гибридного индекса и последовательной фильтрации пикселей, искаженных теневыми, яркими и смешанными спектральными составляющими.

Применение предлагаемого подхода демонстрирует эффективность отслеживания динамики водных объектов во времени. Использование различных масок надежно отделяет водные объекты от прилегающих элементов ландшафта и позволяет интегрировать данные даже в сложных городских и природных условиях.

Разработанный подход служит основой для количественной оценки состояния речных водных поверхностей, включая измерения площади и длины, а также для систематического мониторинга и эффективного управления речной сетью. Дальнейшие исследования могут быть направлены на адаптацию данного подхода к различным климатическим и сезонным условиям, что расширит область его применения и повысит точность идентификации водных объектов. Таким образом, предлагаемый метод позволяет надежно и воспроизводимо определять состояние водной поверхности, открывая возможность комплексного мониторинга состояния реки и ее динамики в исследуемом районе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ондасынова Д. Н., Хлебникова Е. П. Мониторинг изменения русла реки Иртыш с использованием спутниковых снимков Sentinel-2 // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения. – Сибирский Государственный университет геосистем и технологий, 2023. – С. 24-31.
2. Zhang Y., Li X., Wang J., et al. Water Information Extraction Based on Multi-Model RF Algorithm and Sentinel-2 Image Data // Sustainability. – 2022. – Vol. 14 (7). – P. 1-20.
3. Wang W., Li Y., Yang Y. Long-Term Changes in Water Body Area Dynamic and Extraction Using Landsat Data // International Journal of Remote Sensing. – 2023. – Vol. 15 (7). – Article 1816.

4. González B., Xu H. Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery // International Journal of Remote Sensing. – 2006. – Vol. 27 (14). – P. 3025-3033.
5. Gupta S., D. U., Hebbar R. Analysis and Application of Multispectral Data for Water Segmentation Using Machine Learning [Электронный ресурс]. – 2023. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/370567278_Analysis_and_Application_of_Multispectral_Data_for_Water_Segmentation_Using_Machine_Learning
6. Du Y., Zhang Y., Liu Y., Sun W. Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band // Remote Sensing. – 2016. – Vol. 8 (4). – Article 354.
7. Yang X., Zhao S., Qin X., Zhao N., Liang L. Mapping of Urban Surface Water Bodies from Sentinel-2 MSI Imagery at 10 m Resolution via NDWI-Based Image Sharpening // Remote Sensing. – 2017. – Vol. 9 (6). – Article 596.
8. Weekley D., Li X. Tracking Multidecadal Lake Water Dynamics with Landsat Imagery and Topography/Bathymetry // Water Resources Research. – 2019. – Vol. 55. – P. 8350-8367.
9. Киселева Е. М. Автоматизация выделения водных объектов на основе данных дистанционного зондирования Земли // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 4. – С. 115-124.
10. Умбеткалиев Н. М., Кенжегалиев А. М., Кузнецова Т. Н. Применение водных индексов Sentinel-2 для оценки динамики водных объектов в засушливых регионах Казахстана // Геоинформационные технологии и дистанционное зондирование Земли. – 2025. – № 2(18). – С. 45-56.

© Д. Н. Ондасынова, Е. П. Парфенова, 2026