БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ • BULGARIAN ACADEMY OF SCIENCES
- - - - - - - - - - - - - -
ПРОБЛЕМИ НА ГЕОГРАФИЯТА • 3-4 • PROBLEMS OF GEOGRAPHY
София • 2026 • Sofia

ПРОСТРАНСТВЕНО МОДЕЛИРАНЕ НА СЪВРЕМЕННАТА ЛАНДШАФТНА СТРУКТУРА НА ВЛАЖНАТА СИСТЕМА „СРЕБЪРНА“

Георги Железов[1], *Юлиан Тотев*[1], *Велимира Стоянова*[1], *Георги Белев*[2], *Алексей Бендерев*[3], *Петър Гергинов*[3]

DOI: 10.7546/PG.3-4.2026.05

How to cite: **Zhelezov, G., Totev, Y., Stoyanova, V., Belev, G., Benderev, A., Gerginov, P.** 2026. Spatial modelling of the contemporary landscape structure of the Srebarna wetland system. *Problems of Geography*, 3, pp 102-125. ISSN 2367-6671. DOI: 10.7546/PG.3-4.2026.05

Влажните зони са сред най-динамичните природни системи, характеризиращи се със сложна пространствена структура и висока чувствителност към измененията на хидроложкия режим. Целта на настоящото изследване е да се разработи и приложи интегриран подход за пространствено моделиране и количествена оценка на съвременната ландшафтна структура на влажната система „Сребърна“ към 25 юли 2025 г. Изследването се основава на мултиспектрални сателитни данни Sentinel-2 Level-2A, цифров модел на релефа и данни от CORINE Land Cover (CLC) 2018, интегрирани в ГИС среда. За характеризиране на водните площи и растителността са изчислени нормализираният диференциален воден индекс (NDWI) и нормализираният

[1]Национален институт по геофизика, геодезия и география-Българска академия на науките (НИГГГ-БАН), Департамент География; j.j.totev@gmail.com; stoyanovavelimira@gmail.com,
National Institute of Geophysics, Geodesy, and Geography-Bulgarian Academy of Sciences (NIGGG-BAS), Department “Geography”; j.j.totev@gmail.com; stoyanovavelimira@gmail.com,
[2]Институт за изследвания на климата, атмосферата и водите-Българска академия на науките (ИИКАВ-БАН); zbelev@abv.bg
Institute for Climate, Atmosphere and Water Research-Bulgarian Academy of Sciences (CAWRI-BAS); zbelev@abv.bg
[3]Геологически институт – Българска академия на науките (ГИ-БАН); alekseybenderev@yahoo.com; p.gerginov@mail.bg
Geological Institute – Bulgarian Academy of Sciences (GI-BAS); alekseybenderev@yahoo.com; p.gerginov@mail.bg

диференциален вегетационен индекс (NDVI). Въз основа на NDWI е извършено автоматизирано извличане на водното огледало, а чрез съвместна интерпретация на индексните изображения, изображението в естествени цветове и наличните пространствени данни са идентифицирани основните компоненти на ландшафтната структура. Данните от CLC 2018 са използвани за характеризиране на земното покритие на прилежащите територии, като първоначалните класове са обединени в по-общи категории. Разработеният пространствен модел показва доминиране на хидрофитните формации, следвани от осушените участъци и откритото водно тяло. Получените резултати демонстрират приложимостта на интегрирания дистанционен и ГИС-базиран подход за детайлно пространствено характеризиране на състоянието на влажната система „Сребърна“ и създават основа за последващ мониторинг на нейната ландшафтна структура.

Ключови думи: Сребърна; влажни зони; ландшафтна структура; пространствено моделиране; Sentinel-2; дистанционни изследвания; ГИС; NDWI; NDVI.

SPATIAL MODELLING OF THE CONTEMPORARY LANDSCAPE STRUCTURE OF THE SREBARNA WETLAND SYSTEM

Georgi Zhelezov[1], Yulian Totev[1], Velimira Stoyanova[1], Georgi Belev[2], Aleksey Benderev[3], Petar Gerginov[3]

Abstract*:* Wetlands are among the most dynamic and environmentally sensitive natural systems, characterized by complex interactions between hydrological processes, vegetation, relief, and surrounding land-cover patterns. Their spatial structure may vary considerably in response to fluctuations in water regimes, which makes the availability of up-to-date spatial information particularly important for their assessment, monitoring, and sustainable management. The Srebarna wetland system, located in northeastern Bulgaria along the Danube River, represents a protected wetland of high ecological and conservation significance and is characterized by a heterogeneous spatial configuration of open water, extensive hydrophytic vegetation, periodically dried areas, and surrounding terrestrial landscapes. In this context, the integration of satellite remote sensing and Geographic Information Systems (GIS) provides an effective framework for detailed and reproducible spatial characterization of its contemporary landscape structure. The aim of the present study is to develop and apply an integrated approach for spatial modelling and quantitative assessment of the contemporary landscape structure of the Srebarna wetland system as of 25 July 2025. The analysis is based on Sentinel-2 Level-2A multispectral satellite data, a digital elevation model (DEM), and CORINE Land Cover (CLC) 2018 data integrated within a GIS environment. The Normalized Difference Water Index (NDWI) and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) were calculated from the Sentinel-2 imagery to support the differentiation and spatial characterization of open water and vegetation. NDWI was subsequently used for the automated extraction of the water surface, providing a satellite-derived representation of the spatial extent of open water at the time of image acquisition.

NDVI, together with natural-colour Sentinel-2 imagery and expert interpretation, supported the characterization of vegetation patterns and the differentiation of the principal components of the wetland landscape. To provide a broader spatial context, CORINE Land Cover 2018 was used as baseline land-cover information for the territories adjacent to the wetland, with the original CLC classes aggregated into broader categories corresponding to the scale and objectives of the study. The resulting thematic spatial layers were integrated within GIS to construct a comprehensive model of the contemporary landscape structure of the Srebarna wetland system. The model demonstrates the pronounced spatial dominance of hydrophytic formations within the investigated wetland area, followed by dried areas and the open water body, while the surrounding territory is represented through the generalized land-cover categories derived from CLC 2018. The automatically extracted water surface was additionally compared spatially with the water body represented in the final integrated landscape model, allowing the correspondence and differences between the satellite-derived and interpreted spatial representations to be assessed. The proposed methodological framework combines multispectral satellite imagery, spectral indices, automated water-surface extraction, GIS-based spatial analysis, land-cover information, and expert interpretation within a unified workflow. The study demonstrates the applicability of this integrated approach for detailed spatial characterization of the current state of the Srebarna wetland system without implying temporal change from a single satellite observation. The developed spatial model provides a reference representation of the wetland landscape as of 25 July 2025 and establishes a methodological basis for subsequent multi-temporal analyses and monitoring of changes in water extent, vegetation patterns, and the overall landscape structure. The results may also provide useful spatial information for future environmental assessment, conservation planning, and long-term monitoring of this protected wetland system.

Keywords: Srebarna; wetlands; landscape structure; spatial modelling; Sentinel-2; remote sensing; GIS; NDWI; NDVI

ВЪВЕДЕНИЕ

Ландшафтите представляват сложни пространствени геосистеми, формирани в резултат от взаимодействието между природните компоненти и антропогенната дейност. Пространствената им организация и функциониране се определят от взаимовръзките между геоложката основа, релефа, климата, водите, почвите и растителността, които обуславят тяхната структура, динамика и развитие (Turner et al., 2001; Пенин, 2007; Wu, 2013; Hersperger et al., 2021). Ландшафтите се характеризират със специфична пространствена структура и функционални взаимовръзки, определящи тяхната устойчивост и реакция спрямо променящите се природни и антропогенни условия (Bürgi et al., 2005; Tappeiner et al., 2021).

Особено динамични в това отношение са влажните зони, които заемат преходно положение между сухоземните и водните ландшафтни системи. Тяхната структура и функциониране се определят от сложното взаимодействие между водния режим, релефа, почвите и растителността. Колебанията във водните нива и пространствения обхват на водните площи оказват непосредствено влияние върху разпространението на хидрофитната растителност и съотношението между водни, преходни и сухоземни участъци. Влажните зони се отличават с висока динамичност и чувствителност към измененията на природната среда и антропогенните въздействия и същевременно изпълняват множество екосистемни функции и услуги (Mitsch & Gosselink, 2015; Ramsar Convention Secretariat, 2018; Finlayson, 2023). В този контекст пространственото моделиране и геоинформационните технологии предоставят важни възможности за интегриране, анализ и актуализиране на информацията за тяхното състояние.

Теоретичните и приложните аспекти на пространственото моделиране на влажните зони са развити и систематизирани в монографията на Железов (2022), в която влажните системи се разглеждат като динамични пространствени комплекси, функциониращи в неразривна връзка с прилежащите територии. В този контекст геоинформационните технологии и пространственото моделиране се използват като инструменти за интегриране и анализ на информацията за състоянието, структурата и трансформациите на влажните зони. Съществено място заема комплексното разглеждане на влажните системи съвместно със съседните горски, тревни и земеделски територии, селищата и различните форми на стопанска дейност (Железов, 2022). Подобен подход позволява влажната зона да бъде анализирана не като изолирано водно тяло, а като част от по-широка пространствено и функционално свързана ландшафтна система.

Влажната система „Сребърна“ е сред най-значимите влажни зони в България и е обект на продължителни и многоаспектни научни изследвания. Първоначалните проучвания са свързани предимно с нейното орнитологично значение, като впоследствие изследователската проблематика се разширява към растителността, биоразнообразието, хидробиологичните характеристики, хидроложкия режим, екологичното състояние и функционирането на влажната система. Съществен принос за систематизирането на знанията за природните характеристики и биологичното разнообразие на резервата имат изследванията на Мичев, Стойнева и техни съавтори (Michev et al., 1998; Michev and Stoyneva, 2007). Натрупаните изследвания показват значителна изученост на биологичните компоненти, но сравнително по-неравномерно представяне на геоложките, геоморфоложките, хидрогеоложките и комплексните пространствени аспекти.

Важна основа за комплексното познаване на територията представлява Планът за управление на поддържан резерват „Сребърна“ (Хибаум и др., 2001), в който е систематизирана информация за геоложкия строеж, геоморфологията и хидрогеологията, хидроложкия режим, климата, почвите, качеството на водите, местообитанията, растителността и различните компоненти на биотата. Планът включва също пространствена, картографска и ГИС информация и представлява важна информационна основа за изучаването, управлението и опазването на защитената територия.

Наред с биологичните, екологичните и природозащитните проучвания постепенно се развива пространственото и геоинформационното направление в изследването на резерват „Сребърна“. Особено значение има разработката на Nikolova, Vatseva and Nikolov (2010), в която чрез ГИС подход се оценяват пространствените аспекти на динамиката на езерната екосистема. В последващи изследвания са разгледани съвременното екологично състояние и пространственото моделиране на влажната система, трансформациите на растителността и свързаните с тях екосистемни услуги (Zhelezov, 2010; 2011; 2012).

Пространственото моделиране е доразвито и систематизирано в монографията „Реконструкционни и трансформационни модели и моделиране на системите от влажни зони в крайбрежните региони на България“ (Железов, 2022), в която пространственото моделиране е приложено в по-широкия контекст на състоянието, развитието и трансформациите на влажните системи в Дунавския и Черноморския крайбрежен регион. Монографията включва както теоретичните основи на пространствените модели и моделирането, така и анализ на състоянието и динамичното развитие на по-значими системи от влажни зони в Дунавския крайбрежен регион.

Приложението на дистанционните изследвания допълнително разширява възможностите за пространствен анализ на резерват „Сребърна“. Иванова и Недков (2015) използват сателитни, наземни и GPS данни при изследване на сезонната динамика на плаващите тръстикови острови в езерото. В по-нови изследвания Dimov et al. (2025) прилагат интегрирани дистанционни методи за картографиране и мониторинг на екосистемата на езерото Сребърна, докато Vidinova et al. (2025) разглеждат измененията на биологични качествени елементи в контекста на проведени възстановителни дейности. Тези публикации показват нарастващото значение на дистанционните и геопространствените методи за характеризиране и наблюдение на влажната система.

Натрупаните знания и основните направления в изучаването на езерото Сребърна са систематизирани в обзорно изследване на Железов и др. (2026). В него са проследени развитието на проучванията на влажната система и

различията в степента на изученост на отделните компоненти на природната среда.

Съвременните мултиспектрални сателитни данни, и по-специално Sentinel-2, създават нови възможности за детайлно пространствено характеризиране на влажните зони към конкретен момент. Съчетаването им със спектрални индекси и ГИС позволява разграничаване и количествено характеризиране на основни компоненти на ландшафтната структура. Нормализираният диференциален воден индекс (NDWI) може да бъде използван за идентифициране и автоматизирано извличане на откритите водни площи, докато нормализираният диференциален вегетационен индекс (NDVI) подпомага пространственото характеризиране на растителната покривка. Интегрирането на тези продукти с други пространствени данни позволява изграждането на тематични модели, представящи състоянието на влажната система към определен момент.

Въпреки значителната изученост на Сребърна и съществуващите приложения на ГИС и дистанционни методи, остава необходимостта от интегриран подход, който да съчетава актуални мултиспектрални сателитни данни, спектрални индекси, автоматизирано извличане на водното огледало, ГИС-базиран пространствен анализ и експертна интерпретация в единна методическа последователност. Подобен подход позволява получаването на пространствено съгласувана характеристика на основните компоненти на влажната система към конкретен момент, която може да служи като референтна основа за последващи сравнителни и мониторингови изследвания.

Целта на настоящото изследване е разработването и прилагането на интегриран подход за пространствено моделиране и количествена оценка на ландшафтната структура на влажната система „Сребърна“, основан на мултиспектрални сателитни данни Sentinel-2, спектралните индекси NDWI и NDVI, автоматизирано извличане на водното огледало и ГИС-базиран пространствен анализ.

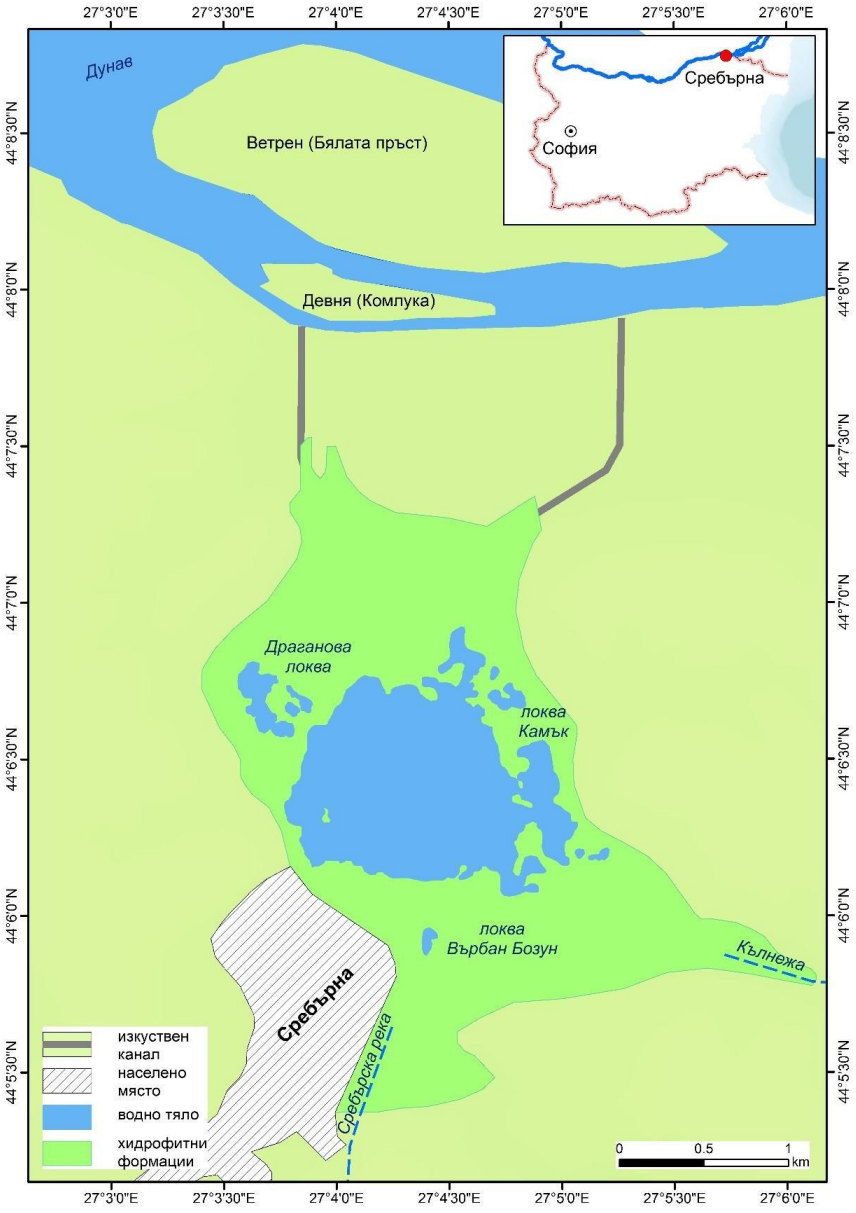
ПРИРОДНОГЕОГРАФСКА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ИЗСЛЕДВАНИЯ РАЙОН

Районът на изследване е влажната система „Сребърна“, която обхваща езерото Сребърна и прилежащите му територии в пространствения обхват между 44°05′–44°09′ N и 27°02′–27°06′ E. Тя е разположена в североизточната част на България, в непосредствена близост до десния бряг на р. Дунав, приблизително на 17 km западно от гр. Силистра (фиг. 1).

В природногеографско отношение районът принадлежи към Дунавската равнина и представлява крайдунавски езерен комплекс с естествен произход, формиран в заливната тераса на р. Дунав. Езерото Сребърна е формирано преди

около 8000 години вследствие на заливането на крайречната тераса от водите на Дунав (Nikolova et al., 2010; Железов и др., 2026). Релефът на изследваната територия се характеризира със слаб наклон на земната повърхност.

Климатът на района е умереноконтинентален, със студена зима и горещо лято. Средногодишното количество на валежите е около 500 mm (Хибаум и др., 2001; Nikolova et al., 2010).



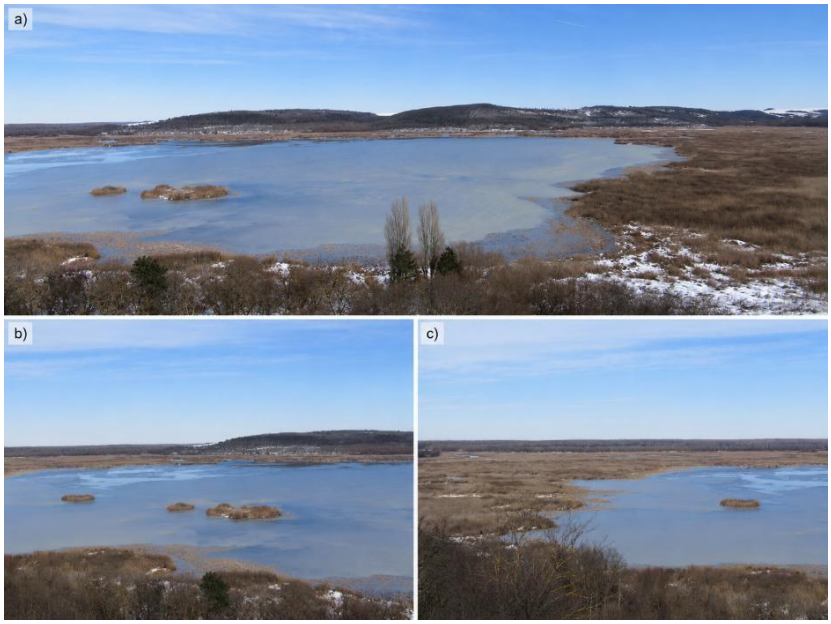
Фиг. 1. Географско положение и пространствен обхват на изследвания район – влажната система „Сребърна“ и прилежащите територии (изготвил: Юлиан Тотев)

Почвената покривка е представена от черноземни, алувиални, алувиално-ливадни и блатни почви, като разпространението им е свързано с особеностите на релефа и хидроложките условия (Хибаум и др., 2001; Nikolova et al., 2010).

Съществено значение за хидроложкия режим на влажната система има връзката ѝ с р. Дунав. Естественият водообмен между езерото и реката е прекъснат в края на 40-те години на XX век вследствие на изграждането на крайдунавската дига. През 1994 г. връзката с Дунав е възстановена чрез изграждането на изкуствен канал, осигуряващ контролиран приток на речни води към езерото (Хибаум и др., 2001; Nikolova et al., 2010; Железов и др., 2026).

В ландшафтно отношение районът се характеризира с разнообразие от водни, растителни и сухоземни компоненти, чието пространствено разпределение е тясно свързано с хидроложкия режим на влажната система. Основни елементи са откритото водно тяло, тръстиковите и други хидрофитни формации, влажните ливади, земеделските земи и горските участъци. Значителна част от влажната система е заета от хидрофитна растителност, представена основно от съобщества на обикновена тръстика (*Phragmites australis*), папур (*Typha spp.*) и други влаголюбиви видове (Железов, 2022).

Общият облик на влажната система и пространственото съчетание между откритите водни площи, хидрофитната растителност и прилежащите територии са представени на фиг. 2



Фиг. 2. Панорамни изгледи към влажната система „Сребърна“ през зимния период: a) общ изглед към водното тяло и прилежащите територии; b) открита водна площ и растителни острови; c) преход между откритото водно огледало и хидрофитните формации (сн.: Юлиан Тотев).

МЕТОДИ И ДАННИ

Методичен подход за пространствено моделиране

Пространственото моделиране представлява подход за интегриране, анализ и интерпретация на пространствена информация за структурата и организацията на географските системи. В ландшафтните изследвания то позволява съвместното разглеждане на различни природни и антропогенни компоненти и на техните пространствени взаимовръзки чрез използването на географски информационни системи, дистанционни изследвания и методи за пространствен анализ (Hersperger et al., 2021; Longley et al., 2021).

Методичният подход в настоящото изследване се основава на принципите за пространствено моделиране на влажни зони, при които те се разглеждат като системи от взаимосвързани водни, растителни и сухоземни компоненти (Железов, 2022).

Изходни данни и софтуерна среда

Изследването се основава на интегрираното използване на сателитни и пространствени данни, обработени и анализирани в ГИС среда. Основен източник за характеризиране на състоянието на влажната система е мултиспектрално изображение Sentinel-2 Level-2A от 25.07.2025 г. Данните са обработени в ArcGIS Pro 3.0 (Esri) в координатна система WGS 84 / UTM Zone 35N (EPSG:32635). Основните използвани данни, техните източници и предназначение са представени в табл. 1.

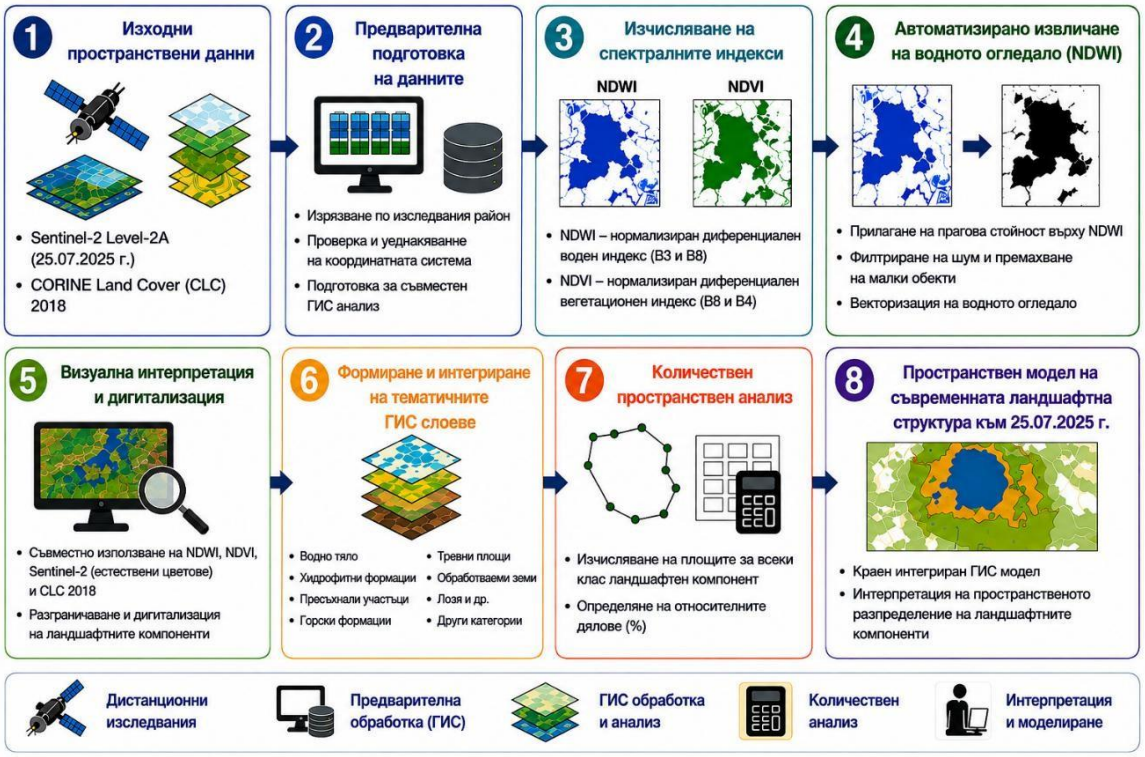
Таблица 1.

Използвани пространствени данни и тяхното предназначение

Вид данни	Източник	Предназначение
Sentinel-2 Level-2A, 25.07.2025 г.	Copernicus Data Space Ecosystem	Изчисляване на спектралните индекси, визуална интерпретация и характеризиране на състоянието на влажната система
Нормализиран диференциален воден индекс (NDWI)	Изчислен от Sentinel-2 Level-2A	Идентифициране и автоматизирано извличане на откритите водни площи
Нормализиран диференциален вегетационен индекс (NDVI)	Изчислен от Sentinel-2 Level-2A	Характеризиране на растителността и подпомагане на разграничаването на хидрофитните формации
CORINE Land Cover (CLC) 2018	Copernicus Land Monitoring Service	Характеризиране на земното покритие в прилежащите територии и обединяване на класовете в по-общи категории

Етапи на пространственото моделиране

Методическата схема на изследването е представена на фиг. 3 и обобщава последователността на основните етапи при подготовката, обработката, интегрирането и анализа на използваните данни.



Фиг. 3. Методическа схема на пространственото моделиране на съвременната ландшафтна структура на влажната система „Сребърна“

Подходът включва осем последователни етапа, водещи до изграждането и количествената оценка на пространствения модел на съвременната ландшафтна структура на влажната система „Сребърна“ към 25.07.2025 г.

Етап 1. Изходни пространствени данни

Първият етап включва формирането на изходната информационна база за пространствения анализ. Основен източник са мултиспектрални сателитни данни Sentinel-2 Level-2A от 25.07.2025 г., получени чрез Copernicus Data Space Ecosystem. За изследването са използвани спектралните канали B03 (зелен), B04 (червен) и B08 (близък инфрачервен), всеки с пространствена разделителна способност 10 m. Продуктите Level-2A съдържат данни за отражението на земната повърхност (Bottom-of-Atmosphere reflectance). Като допълнителен източник на пространствени данни е използван CORINE Land Cover (CLC) 2018

на Copernicus Land Monitoring Service за характеризиране на земното покритие в прилежащите към влажната система територии.

Етап 2. Предварителна подготовка на данните

Вторият етап включва предварителната подготовка на сателитните данни. Спектралните канали B03, B04 и B08 са обединени в многоканално растерно изображение чрез инструмента Composite Bands, след което изображението е изрязано по границите на изследвания район чрез Extract by Mask.

Етап 3. Изчисляване на спектралните индекси

На третия етап са изчислени нормализираният диференциален воден индекс (NDWI) и нормализираният диференциален вегетационен индекс (NDVI). Изчисленията са извършени в среда ArcGIS Pro 3.0 чрез инструмента Raster Calculator. Пространствената обработка е осъществена в координатна система WGS 1984 UTM Zone 35N (EPSG:32635) при пространствена разделителна способност 10 m. За ограничаване на анализа до изследваната територия е използвана границата на обекта, достъпна чрез информационната система DEIMS-SDR. Същият растерен слой е зададен като основа за размера и подравняването на клетките, с което е осигурено пространствено съответствие между получените индексни изображения.

NDWI е изчислен по формулата (McFeeters, 1996):

$$NDWI = \frac{B03 - B08}{B03 + B08},$$

където B03 е зеленият, а B08 – близкият инфрачервен спектрален канал. Индексът е използван за разграничаване на откритите водни площи от останалите компоненти на земното покритие.

NDVI е изчислен по формулата (Rouse et al., 1974):

$$NDVI = \frac{B08 - B04}{B08 + B04},$$

където B08 е близкият инфрачервен, а B04 – червеният спектрален канал. Индексът е използван за характеризиране на растителната покривка и подпомагане на разграничаването на хидрофитните формации.

Етап 4. Автоматично извличане на водното огледало (NDWI)

На четвъртия етап е извършено автоматично извличане на откритото водно огледало въз основа на стойностите на NDWI. Приложен е праг NDWI > 0, при който пикселите с положителни стойности са определени като открити водни площи, а пикселите със стойности NDWI ≤ 0 – като неводни повърхности. Чрез условна операция е създадена бинарна растерна маска, в която водните пиксели са кодирани със стойност 1, а останалите – с 0.

За последващия пространствен анализ водният клас е отделен от бинарната маска и е преобразуван във векторен полигонов слой.

Векторизацията е извършена без геометрично изглаждане, за да се запази пространствената детайлност, съответстваща на разделителната способност от 10 m на изходните данни Sentinel-2.

Пространственото съответствие между автоматично извлеченото водно огледало и водното тяло, представено в интерпретирания пространствен модел, е оценено чрез площта на тяхното пресечение и показателя Intersection over Union (IoU):

$$IoU = A_{пресечение} / A_{обединение},$$

където A пресечение е общата площ на припокриване между двата слоя, а A обединение – площта на тяхното пространствено обединение. Стойностите на IoU варират между 0 и 1, като стойности, близки до 1, показват по-висока степен на пространствено съответствие.

Етап 5. Визуална интерпретация и дигитализация

Петият етап включва експертна визуална интерпретация и пространствено разграничаване на основните компоненти на влажната система. За тази цел са анализирани съвместно сателитното изображение Sentinel-2 в естествени цветове и получените изображения на NDWI и NDVI. NDWI е използван като индикатор за наличието на открити водни площи, а NDVI – за подпомагане на разграничаването на растителната покривка.

Въз основа на спектралните характеристики, пространствената конфигурация и визуалните различия между отделните повърхности са разграничени три основни компонента: открито водно тяло, хидрофитни формации и осушени участъци. Техните граници са дигитализирани ръчно като отделни полигонови слоеве. Полученото експертно интерпретирано очертание на водното тяло е използвано и при оценката на пространственото съответствие с автоматично извлеченото чрез NDWI водно огледало.

Етап 6. Форматиране и интегриране на тематичните ГИС слоеве

Шестият етап обхваща интегрирането на създадените тематични ГИС слоеве, представящи основните компоненти на влажната система. Полигоновите слоеве на откритото водно тяло, хидрофитните формации и осушените участъци са приведени в обща координатна система WGS 1984 UTM Zone 35N (EPSG:32635), проверени за пространствена съгласуваност и обединени в единна геобаза данни.

За характеризиране на земното покритие в прилежащите територии са използвани векторни данни от CORINE Land Cover (CLC) 2018 (Copernicus Land Monitoring Service, 2018). Първоначалните класове на земното покритие са обобщени в по-широки категории, съответстващи на пространствения обхват и целите на изследването. Към интегрирания пространствен модел са добавени и основните хидрографски елементи, необходими за представяне на връзките

между влажната система, прилежащите територии и р. Дунав. Тези елементи допълват картографското представяне на хидрографската мрежа и показват пространственото положение на езерото спрямо р. Дунав. Получената геобаза данни е използвана като основа за последващия количествен пространствен анализ и за съставянето на окончателния модел на съвременната ландшафтна структура на влажната система „Сребърна“.

Етап 7. Количествен пространствен анализ

Седмият етап включва количествен пространствен анализ на основните компоненти на влажната система. За всеки от създадените полигонови слоеве са изчислени площите на откритото водно тяло, хидрофитните формации и осушените участъци. Изчисленията са извършени в проектирана координатна система WGS 1984 UTM Zone 35N (EPSG:32635), като площите са представени в квадратни километри и хектари.

Относителният дял на всеки компонент е определен спрямо общата площ на пространствено разграничените компоненти на влажната система по формулата:

Относителен дял (%) = (площ на съответния компонент / обща площ на анализираните компоненти) × 100.

Изчислените площи и относителни дялове са използвани за количествено характеризиране на структурата и пространственото съотношение между основните компоненти на влажната система към датата на сателитното заснемане.

Етап 8. Пространствен модел на съвременната ландшафтна структура към 25.07.2025 г.

Осмият етап включва изграждането на интегриран пространствен модел на съвременната ландшафтна структура на влажната система „Сребърна“. В модела са обединени създадените тематични слоеве на откритото водно тяло, хидрофитните формации и осушените участъци, както и обобщените категории земно покритие в прилежащите територии и основните хидрографски елементи.

Отделните пространствени компоненти са систематизирани и визуализирани чрез единна картографска легенда и съгласувана символизация.

Моделът е съставен в координатна система WGS 1984 UTM Zone 35N (EPSG:32635) и представя състоянието на изследваната територия към датата на сателитното заснемане – 25 юли 2025 г. Полученият картографски продукт е използван за анализ на пространственото разпределение и съотношението между основните компоненти на влажната система.

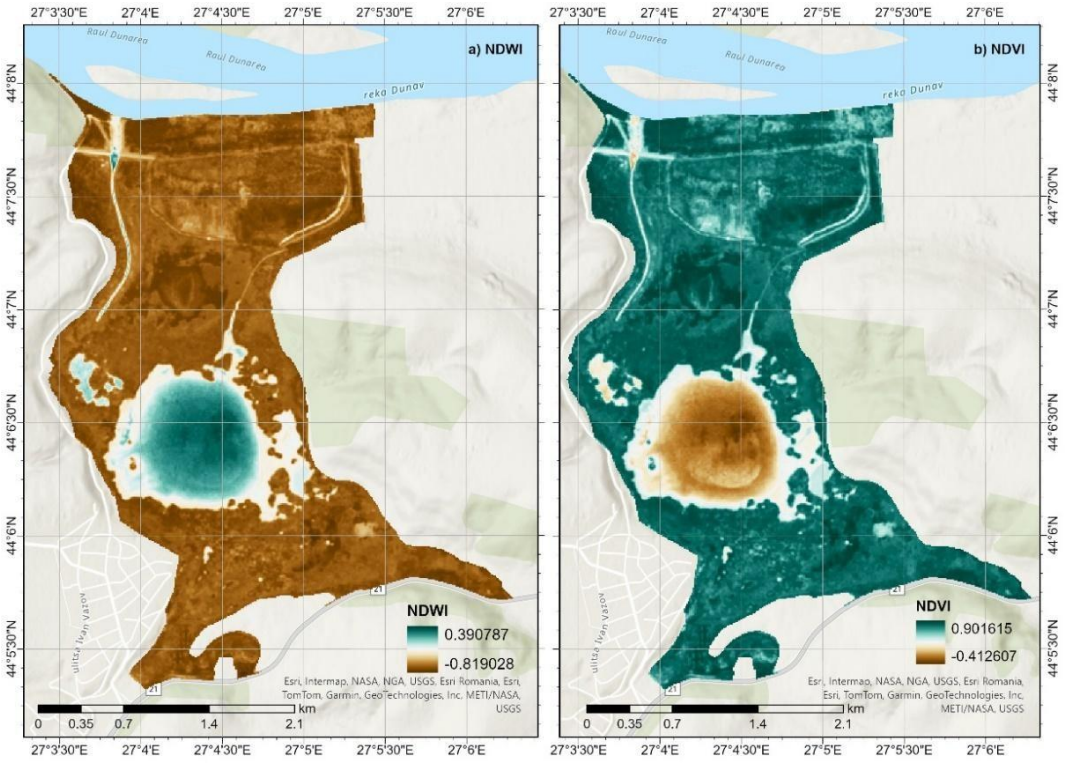
РЕЗУЛТАТИ

Спектрални индекси и оценка на пространственото съответствие

Изчислените спектрални индекси показват ясно пространствено разграничаване между откритото водно огледало, растителната покривка и останалите повърхности в границите на изследваната територия.

Стойностите на NDWI варират между −0,819 и 0,391 при средна стойност −0,551. Положителните стойности са концентрирани предимно в централната част на влажната система и очертават откритото водно огледало. Отрицателните стойности преобладават в прилежащите участъци, заети от растителност, оголени повърхности и други неводни компоненти (фиг. 4).

Стойностите на NDVI варират между −0,413 и 0,902 при средна стойност 0,616. Най-ниските стойности се установяват в границите на откритото водно тяло, докато по-високите положителни стойности характеризират териториите с добре изразена растителна покривка. Съпоставянето на двата индекса показва ясно изразено спектрално противопоставяне между водната повърхност и растителните компоненти на влажната система (фиг. 4).



Фиг. 4. Пространствено разпределение на: а) нормализирания диференциален воден индекс (NDWI) и б) нормализирания диференциален вегетационен индекс (NDVI) в района на влажната система „Сребърна“ по данни от Sentinel-2 L2A от 25 юли 2025 г.
Картографска подложка: Esri World Topographic Map (изготвил: Георги Белев)

Прилагането на прага NDWI > 0 позволи автоматичното извличане на откритото водно огледало. Получената бинарна маска включва 7112 водни пиксела, които при пространствена разделителна способност 10 m съответстват на площ 0,7112 km². Площта на водното тяло, представено в експертно интерпретирания пространствен модел, е 0,704312 km². Абсолютната разлика между двете оценки е 0,006888 km², или приблизително 0,69 ha.

Площта на пресечението между автоматично извлеченото и експертно интерпретираното водно тяло е 0,693362 km², а площта на тяхното пространствено обединение – 0,722150 km². Получената стойност на показателя Intersection over Union е IoU = 0,9601, което показва много висока степен на пространствено съответствие между двата слоя. Площта на пресечението представлява 98,45 % от площта на експертно интерпретираното водно тяло и 97,49 % от площта на автоматично извлеченото водно огледало.

Получените резултати показват приложимостта на NDWI за автоматизирано пространствено разграничаване на откритата водна повърхност в рамките на изследваната влажна система. NDVI допълва анализа чрез характеризиране на пространствените различия в растителната покривка. Докато откритото водно огледало е извлечено автоматично въз основа на зададения праг на NDWI, хидрофитните формации и осушените участъци са разграничени чрез съвместна експертна интерпретация на NDWI, NDVI и сателитното изображение в естествени цветове. Резултатите от двата подхода са интегрирани при изграждането на пространствения модел на съвременната ландшафтна структура.

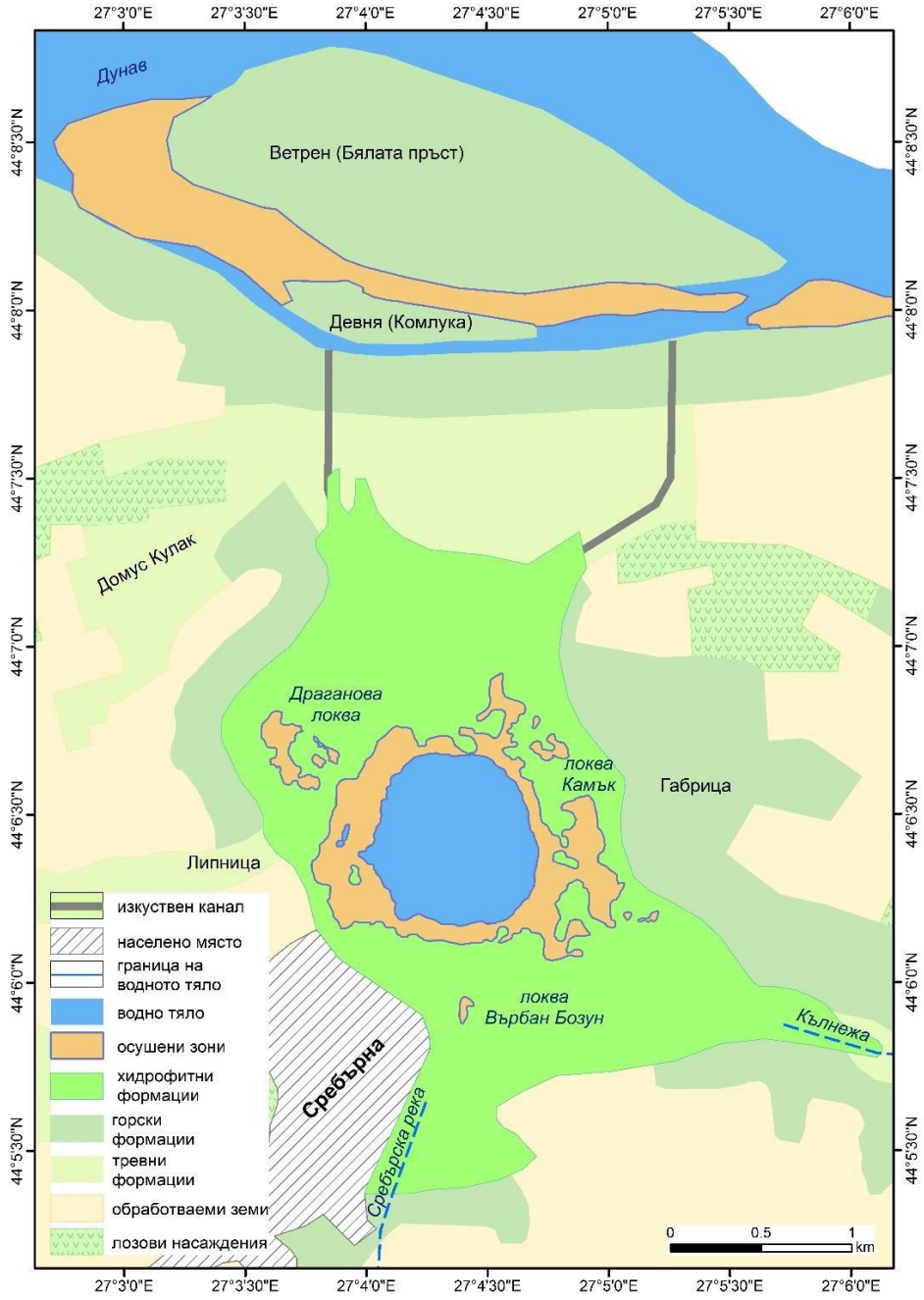
Пространствен модел на съвременната ландшафтна структура

Интегрирането на резултатите от спектралния анализ, автоматичното извличане на водното огледало и експертната визуална интерпретация позволи да бъде характеризирана пространствената организация на основните компоненти на влажната система „Сребърна“ към 25 юли 2025 г. Изграденият пространствен модел представя разположението на откритото водно тяло, хидрофитните формации, осушените участъци и основните типове земно покритие в прилежащата територия (фиг. 5).

Моделът показва ясно изразена пространствена разнородност на ландшафтната структура на влажната система „Сребърна“. В централната част на езерото е обособено откритото водно тяло. Непосредствено около него, както и в северната част на изследваната територия към р. Дунав, са разположени пресъхнали участъци. Те очертават преходни зони между откритата водна повърхност и останалите компоненти на влажната система.

Хидрофитните формации заемат значителна част от изследваната територия и образуват пространствено свързана зона около откритите водни

площи, включително в районите на Драганова локва, локва Камък и локва Върбан Бозун. Съчетанието на открити водни площи, хидрофитни формации и пресъхнали участъци формира пространствена мозайка, която характеризира ландшафтната структура на влажната система към датата на изследването.



Фиг. 5. Пространствен модел на съвременната ландшафтна структура на влажната система „Сребърна“. Земното покритие в прилежащите територии е представено по данни от CORINE Land Cover (CLC) 2018 (изготвил: Юлиан Тотев).

Тези площи представят състоянието, установено към датата на сателитното заснемане – 25 юли 2025 г., поради което на този етап от анализа от тях не се извеждат заключения за посоката или интензивността на измененията във времето. Това е в съответствие и с актуализираната концепция на изследването, при която единичното сателитно наблюдение се използва за характеризиране на текущото състояние, а не като самостоятелно доказателство за времева промяна.

В прилежащите на влажната система територии се наблюдава съчетание от горски и тревни формации, обработваеми земи и лозови насаждения. На север тя е пространствено свързана с крайдунавската зона, включваща островите Ветрен (Бялата пръст) и Девня (Комлука), докато в южната част са представени основните хидрографски елементи, сред които Сребърска река и Кълнежа. Изкуствените канали между езерото Сребърна и р. Дунав допълват пространствения модел и представят влажната система „Сребърна“ в контекста на прилежащата хидрографска мрежа и околните ландшафти.

Пространственото разпределение на основните класове земно покритие в прилежащите територии е представено въз основа на данни от CORINE Land Cover (CLC) 2018, като първоначалните класове са обединени в по-общи категории, съответстващи на мащаба и целите на изследването.

Това позволява актуалното пространствено състояние на водните и влажните компоненти да бъде разгледано в контекста на основните типове земно покритие около влажната система. Ролята на CLC 2018 именно като базова информация за прилежащите територии е заложена и в актуализираната методологична постановка на настоящата публикация.

Полученият модел представя интегрирана картина на състоянието и пространствената организация на влажната система „Сребърна“ към 25 юли 2025 г. и позволява количествено характеризиране на основните структурни компоненти.

Количествената оценка показва ясно изразени различия в заеманата от отделните компоненти площ (табл. 2). Общата площ на трите анализирани категории възлиза на 5,951 km². Най-голям дял заемат хидрофитните формации – 4,444 km², или 74,7 % от анализираната площ. Осушените участъци обхващат 0,803 km² (13,5 %), докато откритото водно тяло заема 0,704 km² (11,8 %).

Полученото съотношение между основните компоненти показва ясно доминиране на хидрофитните формации, които заемат близо три четвърти от анализираната площ. Значително по-малък е делът на пресъхналите участъци и на откритото водно тяло, като пресъхналите площи имат малко по-голямо пространствено разпространение от откритата водна повърхност. Количествените резултати допълват картографското представяне и

потвърждават преобладаващата роля на хидрофитните формации в съвременната структура на влажната система към 25 юли 2025 г.

Таблица 2.

Количествена характеристика на основните компоненти на влажната система „Сребърна“, представени в базовия пространствен модел

Тематичен клас	**Площ (km²)**	**Дял (%)**	**Пространствена характеристика**
Водно тяло	0,704	11,8	Централна част
Осушени участъци	0,803	13,5	Предимно около откритото водно тяло
Хидрофитни формации	4,444	74,7	Доминиращ компонент
Общо	**5,951**	**100,0**	-

Забележка: Площите и относителните дялове са изчислени въз основа на тематичните класове, представени в базовия пространствен модел. Данните от CORINE Land Cover (CLC) 2018 са използвани за характеризиране на основните класове земно покритие в прилежащите територии, като първоначалните класове са обединени в по-общи категории.

ДИСКУСИЯ

Полученият пространствен модел разкрива ясно изразена вътрешна диференциация на влажната система „Сребърна“ към 25 юли 2025 г. Установеното съотношение между хидрофитните формации, осушените участъци и откритото водно огледало показва преобладаването на растителния компонент в границите на изследваната територия. Хидрофитните формации заемат 4,444 km², или 74,7 % от моделираната площ, докато осушените участъци обхващат 0,803 km² (13,5 %), а откритото водно огледало – 0,704 km² (11,8 %). Тази пространствена конфигурация характеризира влажната система като хетерогенен комплекс, в който откритите водни площи са съчетани с обширни участъци, заети от влаголюбива растителност, и с територии без установено водно покритие към момента на сателитното заснемане.

Преобладаването на хидрофитните формации е в съответствие с природните особености на „Сребърна“, където тръстиковите, папуровите и други влаголюбиви растителни съобщества имат съществено значение за пространствената организация и функционирането на влажната система (Хибаум и др., 2001; Железов, 2022 и др.). Разпространението им формира преход между откритото водно огледало и прилежащите сухоземни територии и допринася за мозаечния характер на ландшафтната структура. Получените резултати обаче представят състоянието към една конкретна дата и сами по себе си не позволяват да се установи дали наблюдаваният обхват на хидрофитната растителност е резултат от разширяване, свиване или сезонна промяна. В изследването си Gartsiyanova and Kitev (2023) посочват, че приблизително две

трети от площта на езерото са заети от тези растителни съобщества. Тези данни осигуряват екологичен контекст за установения в настоящото изследване дял на хидрофитните формации (74,7%), но не представляват пряка количествена валидация, тъй като се отнасят до различен пространствен обхват, дата и методика.

Пространственото присъствие на осушени участъци показва, че към датата на изследването част от територията не е заета нито от открито водно огледало, нито от ясно изразена хидрофитна растителност. Тези участъци представляват важен компонент на съвременната ландшафтна структура, тъй като пространственото им разположение отразява съчетаното влияние на релефа, водния режим, почвената влажност и растителното покритие. Независимо от това тяхното определяне въз основа на еднократно сателитно наблюдение не позволява да бъдат разграничени устойчиво осушените територии от временно пресъхналите или сезонно преовлажнявани участъци. За подобно разграничаване са необходими многодатови сателитни изображения, съпоставени с хидроложки и теренни наблюдения (Хибаум и др., 2001; Железов, 2022 и др.).

Съвместното използване на NDWI и NDVI подпомага разграничаването на основните компоненти на влажната система, тъй като двата индекса отразяват различни характеристики на земната повърхност. Положителните стойности на NDWI очертават предимно откритото водно огледало, докато високите положителни стойности на NDVI характеризират участъците с добре развита растителна покривка. Противопоставянето между индексите е най-ясно в централната водна площ, където положителните стойности на NDWI съответстват на ниски или отрицателни стойности на NDVI. В преходните зони разграничаването е по-сложно поради смесения спектрален сигнал от вода, растителност, влажни почви и оголени повърхности. Поради това комбинирането на спектралните индекси със сателитното изображение в естествени цветове и с експертна интерпретация е по-подходящо от използването на един индекс като самостоятелен класификационен критерий.

Високата стойност на Intersection over Union (IoU = 0,9601) показва много добро пространствено съответствие между автоматично извлеченото чрез NDWI водно огледало и водното тяло, включено в експертно интерпретирания пространствен модел. Малката разлика между площите на двата слоя и високият дял на общото им пространствено покритие потвърждават приложимостта на прага NDWI > 0 за разграничаване на откритата водна повърхност при конкретните спектрални и хидроложки условия към датата на изследването. Установените различия са концентрирани предимно по периферията на водното тяло, където наличието на плитки води, плаваща или

крайбрежна растителност, влажни почви и смесени пиксели затруднява определянето на еднозначна граница.

Получената стойност на IoU следва да се разглежда като показател за пространствената съгласуваност между автоматичния и експертния начин на разграничаване, а не като независима оценка на тематичната точност. Експертно интерпретираният слой е създаден въз основа на същото сателитно изображение, допълнено от NDWI, NDVI и визуална интерпретация, поради което двата сравнявани резултата не са напълно независими. Освен това не са използвани синхронни теренни наблюдения от 25 юли 2025 г., чрез които да бъде проверено действителното положение на бреговата линия. Независима валидация би могла да бъде извършена при бъдещи изследвания чрез теренни измервания, изображения с по-висока пространствена разделителна способност или други референтни данни, получени за същия период.

Получените резултати допълват предходните геоинформационни и дистанционни изследвания на влажната система „Сребърна“ (Nikolova et al., 2010; Иванова и Недков, 2015; Dimov et al., 2025; Vidinova et al., 2025), като представят пространствено съгласувана характеристика на основните компоненти на нейната ландшафтна структура към конкретен момент. Специфичният принос на настоящото изследване се състои в интегрирането на спектрални индекси, автоматично извличане на откритото водно огледало и експертна интерпретация в единна методическа последователност. Количественото сравнение чрез IoU допълва модела с оценка на съответствието между автоматичното и експертното пространствено разграничаване на водната повърхност.

Включването на обобщените категории от CORINE Land Cover 2018 позволява влажната система да бъде представена във връзка с прилежащите земеделски, горски, тревни и урбанизирани територии. Подобно контекстуално разглеждане е важно, тъй като влажните зони функционират като част от по-широки пространствено и функционално свързани ландшафтни системи (Железов, 2022). Данните от CLC 2018 обаче имат по-обща пространствена и тематична детайлност и предхождат използваното сателитно изображение. Поради това те не са включени в количественото съотношение между компонентите на влажната система, а служат единствено за характеризиране на нейния по-широк ландшафтен контекст.

Основно ограничение на изследването е използването на едно сателитно изображение, което представя моментното състояние на влажната система, но не позволява извеждането на заключения за сезонна или дългосрочна динамика. Полученият модел следва да се интерпретира като референтна пространствена характеристика към 25 юли 2025 г., а не като доказателство за настъпили изменения спрямо предходни периоди. Върху резултатите могат да влияят също

пространствената разделителна способност от 10 m, наличието на смесени пиксели в преходните зони, избраният праг на NDWI и неизбежният субективен елемент при експертната интерпретация.

Независимо от тези ограничения приложеният подход осигурява последователна основа за картографиране и количествено характеризиране на съвременната ландшафтна структура на влажната система „Сребърна“. При бъдещи изследвания използването на многодатови серии Sentinel-2, съчетани с данни за водните нива, валежите, връзката с р. Дунав и теренни наблюдения, би позволило да бъдат анализирани сезонните колебания на водното огледало, пространствената динамика на хидрофитните формации и измененията в обхвата на осушените и временно пресъхналите участъци. По този начин разработеният модел може да послужи като референтна основа за последващ мониторинг, сравнителни анализи и оценяване на пространствените трансформации във влажната система.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящото изследване представя интегриран подход за пространствено моделиране и количествено характеризиране на съвременната ландшафтна структура на влажната система „Сребърна“. Чрез съвместното използване на данни Sentinel-2 Level-2A, спектралните индекси NDWI и NDVI, автоматизирано извличане на водното огледало, експертна интерпретация и ГИС-базиран пространствен анализ е изграден модел на състоянието на системата към 25 юли 2025 г.

Резултатите показват ясно пространствено разграничаване между основните компоненти на влажната система и подчертават доминиращото участие на хидрофитните формации в нейната съвременна ландшафтна структура. Установеното високо съответствие между автоматичното и експертното разграничаване на водното огледало потвърждава приложимостта на избрания подход при конкретните условия и към датата на изследването.

Основният принос на разработката се състои в интегрирането на автоматизиран и експертен подход за разграничаване на основните компоненти на влажната система и в количественото оценяване на пространственото съответствие между получените представяния на водното огледало. Изграденият модел предоставя пространствено и количествено определена референтна основа, която може да бъде използвана при последващи сравнителни изследвания и мониторинг.

Приложеният подход може да бъде адаптиран за изследване и на други влажни зони при отчитане на техните спектрални, хидроложки и ландшафтни особености. Бъдещото включване на многодатови сателитни изображения,

данни за водните нива и синхронни теренни наблюдения би позволило анализ на сезонната и дългосрочната динамика на водното огледало, хидрофитните формации и временно пресъхващите участъци. Следователно настоящият модел трябва да се разглежда като изходна характеристика на влажната система към конкретен момент и като методическа основа за бъдещи пространствени и времеви анализи.

Благодарности

Настоящата статия представя резултати от проекта „Хидрогеоложки механизми на устойчиво подхранване и съхраняване на карстови влажни зони: изследване на система „Сребърна“, финансиран от Фонд „Научни изследвания“ към Министерството на образованието и науката по договор № КП-06-Н94/7 от 10.12.2025 г. за финансиране на фундаментални научни изследвания.

Л И Т Е Р А Т У Р А

Железов, Г. 2022. Реконструкционни и трансформационни модели и моделиране на системите от влажни зони в крайбрежните региони на България. Дайрект Сървисиз, София. / Zhelezov, G. 2022. Reconstruction and transformation models and modelling of wetland systems in the coastal regions of Bulgaria. Direct Services, Sofia (Bg).

Железов, Г., Г. Желев, М. Траянова-Колева, Ю. Тотев, А. Бендерев. 2026. Геоекологични изследвания на биосферен резерват „Сребърна“ и зоните на подхранването му (Североизточна България) – обзор и анализ. – Сп. на Българското геологическо дружество, 87 (1), 53–68. / Zhelezov, G., G. Zhelev, M. Trayanova-Koleva, Yu. Totev, A. Benderev. 2026. Geoecological studies of the Srebarna Biosphere Reserve and its recharge zones (Northeastern Bulgaria) – review and analysis. *Review of the Bulgarian Geological Society*, 87 (1), 53–68 (Bg).

Иванова, И., Р. Недков. 2015. Сезонна динамика на плаващите тръстикови острови в езерото Сребърна на базата на спътникови, наземни и GPS данни за периода март 2014 г. – март 2015 г. – В: Единадесета научна конференция с международно участие „Космос, екология, сигурност“, 4–6 ноември 2015 г., София, с. 286–291. / Ivanova, I., R. Nedkov. 2015. Seasonal dynamics of floating reed islands in Srebarna Lake based on satellite, terrestrial and GPS data for the period March 2014–March 2015. In: Eleventh Scientific Conference with International Participation “Space, Ecology, Safety”, 4–6 November 2015, Sofia, pp. 286–291 (Bg).

Пенин, Р. 2007. Природна география на България. Булвест 2000, София. / Penin, R. 2007. Physical Geography of Bulgaria. Bulvest 2000, Sofia (Bg).

Хибаум, Г., Т. Мичев, В. Василев, Й. Узунов. 2001. План за управление на поддържан резерват „Сребърна“. Министерство на околната среда и водите, Централна лаборатория по обща екология, София. / Hibaum, G., T. Michev, V. Vasilev, Y. Uzunov. 2001. Management Plan for Srebarna Managed Reserve. Ministry of Environment and Water, Central Laboratory of General Ecology, Sofia (Bg).

Bürgi, M., A. M. Hersperger, N. Schneeberger. 2005. Driving forces of landscape change – current and new directions. *Landscape Ecology*, 19, 857–868. https://doi.org/10.1007/s10980-005-0245-3

Dimov, P., S. Kazakov, T. Isheva, N. Ivanova. 2025. Integrated remote sensing for mapping and monitoring Srebarna Lake ecosystem, Bulgaria. *ARPHA Conference Abstracts*, 8, e150780. https://doi.org/10.3897/aca.8.e150780

Finlayson, C. M. 2023. Climate change and wetlands: Vulnerability, adaptation, mitigation, resolutions, and scientific societies. In: C. M. Finlayson et al. (Eds.). Ramsar Wetlands: Values, Assessment, Management. Elsevier, 495–524. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817803-4.00016-4

Gartsiyanova, K., Kitev, A. 2023. Local conservation of nature heritage as an important component in the Water-Energy-Food Nexus approach – A case study of Srebarna Lake, Bulgaria. *International Journal of Conservation Science*, 14 (3), 1033–1044. https://doi.org/10.36868/IJCS.2023.03.16

Hersperger, A.M., S.R. Grădinaru, A.B. Pierri Daunt, C.S. Imhof, P. Fan. 2021. Landscape ecological concepts in planning: Review of recent developments. *Landscape Ecology*, 36 (8), 2329–2345. https://doi.org/10.1007/s10980-021-01193-y

Longley, P.A., M.F. Goodchild, D.J. Maguire, D.W. Rhind. 2021. Geographic Information Science and Systems. 5th ed. John Wiley & Sons, Hoboken.

McFeeters, S.K. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17 (7), 1425–1432. https://doi.org/10.1080/01431169608948714

Michev, T., B. Georgiev, A. Petrova, M. Stoyneva (Eds.). 1998. Biodiversity of the Srebarna Biosphere Reserve: Checklist and Bibliography. Context & Pensoft, Sofia, 130 pp.

Michev, T., M. Stoyneva (Eds.). 2007. Inventory of Bulgarian Wetlands and Their Biodiversity. Elsi-M, Sofia, 394 pp.

Mitsch, W. J., J. G. Gosselink. 2015. Wetlands. 5th ed. John Wiley & Sons, Hoboken.

Nikolova, M., R. Vatseva, V. Nikolov. 2010. GIS assessment of global change impacts on the dynamics of the Srebarna Lake ecosystem. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Cartography and GIS, 15–20 June 2010, Nessebar, Bulgaria.

Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, D.W. Deering. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, NASA SP-351, Vol. 1, 309–317.

Tappeiner, U., G. Leitinger, A. Zariņa, M. Bürgi.–2021. How to consider history in landscape ecology: Patterns, processes, and pathways. *Landscape Ecology*, 36, 2317–2328. https://doi.org/10.1007/s10980-020-01163-w

Turner, M.G., R.H. Gardner, R.V. O'Neill. 2001. Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process. Springer, New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2794-4

Vidinova, Y., M.B. Beshkova, B.P. Gyosheva, M. Ihtimanska, S. Kazakov, V. Tsavkova, N. Ivanova. 2025. Changes of biological quality elements during rehabilitation activities in LTER site Srebarna Lake (LTER EU BG 007 'SREBARNA'). *ARPHA Conference Abstracts*, 8, e151267. https://doi.org/10.3897/aca.8.e151267

Wu, J. 2013. Landscape sustainability science: Ecosystem services and human well-being in changing landscapes. *Landscape Ecology*, 28 (6), 999–1023. https://doi.org/10.1007/s10980-013-9894-9

Zhelezov, G. 2010. Characteristic of the present ecological status and spatial modeling of Srebarna wetland system, Northeastern Bulgaria. In: E. Morri, R. Santolini (Eds.). Proceedings of the International Conference '*Landscape Ecology* for the Management of the Wetlands', Ravenna, 120–126.

Zhelezov, G. 2011. Modeling of the plant transformations in Biosphere Reserve 'Srebarna' and related ecosystem service. In: L. Zentai, J. Reyes Nuñez (Eds.). Proceedings of the Joint International Cartographic Association Symposium, Orléans, 274–284.

Zhelezov, G. 2012. Ecosystem services of Srebarna wetland system – spatial characteristics and dynamics. In: T. Bandrova, M. Konečný, G. Zhelezov (Eds.). Proceedings of the 4th International Conference on Cartography and GIS, Albena, Bulgarian Cartographic Association, 187–195.

*** **Copernicus Land Monitoring Service.** 2018. CORINE Land Cover 2018 (vector), Europe, 6-yearly. European Environment Agency. https://doi.org/10.2909/71c95a07-e296-44fc-b22b-415f42acfdf0

*** **Ramsar Convention Secretariat.** 2018. Global Wetland Outlook: State of the World's Wetlands and Their Services to People. Ramsar Convention Secretariat, Gland.