Структура и функционирование региональных геосистем
Structure and Functioning of Regional Geosystems

УДК 574.5
DOI 10.52575/2712-7443-2026-50-2-0-1
EDN GPMSDL

Пространственно-временной анализ трансформации дельты реки Великой (1975–2024 гг.) с использованием спутниковых снимков

[1]Евдокимов С.И., [2]Штефуряк А.В.
[1]Псковский государственный университет
Россия, 180000, г. Псков, ул. площадь Ленина, 2
[2]Псковский филиал ГНЦ РФ ФГБНУ «ВНИРО»
Россия, 180007, г. Псков, ул. Максима Горького, 13
serenia-8178@yandex.ru, Shtefuryak2011@mail.ru

Аннотация. Дельта реки Великой является уникальным природным комплексом, выполняющий роль переходной зоны и природного барьера между экосистемами реки Великой и Псковского озера. Здесь происходит взаимодействие и трансформация динамических, химических, физических свойств водных масс, перераспределение и отложение наносов, поддержание водообмена между русловой и прибрежной зонами. В статье представлен пространственно-временной анализ трансформации дельты реки Великой за период 1975–2024 гг. с использованием данных дистанционного зондирования Земли и геоинформационных технологий. Проведено картографирование изменений береговой линии островов в дельте, площади островов и степени зарастания акватории дельты. Дополнительно проанализированы структура, пространственная организация и трансформация растительного покрова, водной поверхности и участков открытых вод. Полученные результаты свидетельствуют о значительном увеличении площади островов, активизации процессов зарастания и постепенной смене растительных сообществ в направлении заболачивания. Выявленные тенденции отражают общие процессы морфологической эволюции дельтовой системы и указывают на её переход к болотному типу экосистемы.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, *Landsat*, дельта, аккумуляция, зарастание, *NDVI*, *NDWI*, *HEC-RAS*, цифровая модель рельефа

Для цитирования: Евдокимов С.И., Штефуряк А.В. 2026. Пространственно-временной анализ трансформации дельты реки Великой (1975–2024 гг.) с использованием спутниковых снимков. Региональные геосистемы, 50(2): 227–244. DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-2-0-1 EDN: GPMSDL

Spatial and Temporal Analysis of the Transformation of the Velikaya River Delta from 1975 to 2024 Using Satellite Images

[1]Sergey I. Evdokimov, [2]Alina V. Shtefuryak
[1]Pskov State University
2 Ploshchad Lenina St., Pskov 180000, Russia
[2]PSK branch of SSC RF VNIRO Federal State Budgetary Scientific Institution
13 Maxim Gorky St., Pskov 180007, Russia
E-mail: serenia-8178@yandex.ru, Shtefuryak2011@mail.ru

© Евдокимов С.И., Штефуряк А.В., 2026

Abstract. The Velikaya River delta is a unique natural complex that acts as a transition zone and natural barrier between the ecosystem of the Velikaya River and the ecosystem of Pskov Lake. Interaction and transformation of dynamic, chemical, and physical properties of water masses, redistribution and deposition of sediments, and maintenance of water exchange between the riverbed and coastal zones take place here. The article presents a spatiotemporal analysis of the transformation of the Velikaya River Delta over the period 1975–2024 using remote sensing data and geoinformation technologies. The changes in the coastline of the islands at the mouth, the area of the islands and the degree of overgrowth of the delta water area have been mapped. Additionally, the authors analyze the structure, spatial organization, and transformation of vegetation, water surface, and open water areas. The results obtained indicate a significant increase in the island area, activation of overgrowing processes and a gradual change of plant communities in the direction of waterlogging. The revealed trends reflect the general processes of morphological evolution of the delta system and indicate its transition to a swamp type of ecosystem.

Keywords: remote sensing of the Earth, Landsat, delta, accumulation, overgrowth, NDVI, NDWI, HEC-RAS, digital relief model

For citation: Evdokimov S.I., Shtefuryak A.V. 2026. Spatial and Temporal Analysis of the Transformation of the Velikaya River Delta from 1975 to 2024 Using Satellite Images. Regional Geosystems, 50(2): 227–244 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2026-50-2-0-1 EDN: GPMSDL

Введение

Дельты рек представляют собой динамичные и уязвимые геоэкосистемы, которые чувствительны к изменению природных условий и антропогенному воздействию. Изменения в таких системах затрагивают широкий спектр пространственных, экологических и гидрологических процессов, что делает их приоритетным объектом научного анализа, особенно в контексте глобального изменения климата и трансформации водно-ландшафтных структур.

Река Великая является крупнейшей водной артерией Псковской области, характеризующейся высоким уровнем водности, разветвленной гидрографической сетью и значительным влиянием на формирование природных ландшафтов региона. Формируя дельту в южной части Чудско-Псковского озера, она образует сложную дельтовую систему, включающую многочисленные рукава, протоки и острова. Эта территория представляет собой трансграничную экотонную зону между речной и озёрной системами, отличающуюся высокой степенью биологического разнообразия и ландшафтной мозаичности [Экологический мониторинг …, 2003]. Значительная часть дельты расположена в пределах особо охраняемой природной территории международного значения – водно-болотного угодья «Псковско-Чудская приозёрная низменность», что подчёркивает её экологическую ценность и необходимость комплексного мониторинга состояния [Лебедева, 2006].

Ранее проведённые исследования дельты реки Великой подтверждают активное развитие процессов зарастания акватории и изменение структуры экосистемы под влиянием как природных, так и антропогенных факторов. В работе С.Г. Михалап, К.Б. Михайловой и Т.В. Дрозденко [2018] проанализировано современное состояние экосистемы дельты и дана оценка её аквакультурного потенциала, выявлены тенденции снижения открытых водных площадей и увеличения биомассы высшей водной растительности. В другой работе С.Г. Михалап и К.Б. Михайловой [2018], основанной на данных полевых наблюдений и дистанционного зондирования Земли, детализированы пространственные особенности зарастания дельты макрофитами и выделены зоны наибольшей динамики водно-растительного покрова. Также в исследовании С.Г. Михалап [2018], представленном на конференции «Вклад особо охраняемых природных территорий в экологическую устойчивость регионов», с использованием данных многолетних спутниковых наблюдений проанализирована динамика зарастания дельты

реки Великой. Автором выявлены пространственные закономерности изменения структуры растительного покрова и постепенного сокращения площадей открытой водной поверхности. Эти исследования заложили основу для дальнейшего изучения пространственно-временных изменений дельтовой системы и показали высокую эффективность применения методов дистанционного зондирования Земли для анализа процессов трансформации речных дельт.

Динамические процессы, протекающие в пределах дельты, проявляются в виде аккумуляции наносов, изменения русловой сети, зарастания акватории высшей водной растительностью, а также деградации открытых водных пространств. Аккумулятивные явления связаны с осаждением взвешенного материала в дельтовой зоне и приводят к перераспределению водных потоков, что, в свою очередь, способствует образованию новых протоков и зарастанию существующих русел. Процессы зарастания вызывают трансформацию водных биотопов, что может повлечь за собой деградацию нерестилищ и изменение видового состава флоры и фауны.

Современные методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в сочетании с геоинформационными системами (ГИС) позволяют проводить комплексный мониторинг пространственно-временных изменений ландшафтов с высокой степенью точности. Использование многолетних спутниковых данных предоставляет возможность временного анализа дельтовых систем, выявления закономерностей трансформации и оценки степени воздействия различных факторов.

В последние десятилетия исследования дельтовых систем приобретают особую значимость в связи с климатическими изменениями, усилением антропогенного воздействия и необходимостью сохранения водно-болотных угодий как ключевых природных ресурсов. Учитывая высокую экологическую и хозяйственную ценность дельты рек, необходимость пространственно-временного мониторинга дельтовых систем с использованием современных технологий дистанционного зондирования и ГИС является актуальной научной задачей, имеющей как теоретическое, так и прикладное значение.

Цель исследования – проведение пространственно-временного анализа динамики дельты реки Великая в период 1975–2024 гг. на основе спутниковых данных и геоинформационного анализа.

Для достижения поставленной цели, нами были решены следующие задачи:

– определить нулевой уровень воды в дельте и смоделировать его с помощью *HEC-RAS* с последующей интеграцией в *QGIS*;

– рассчитать *NDVI* и *NDWI* по снимкам *Landsat* для выделения воды и растительности, и анализа пространственной структуры дельты;

– оценить степень зарастания дельты по классификации Папченкова на основе соотношения растительности и площади водного зеркала;

проанализировать изменения растительности с использованием метода разделения по пороговым значениям *NDVI*, выделив основные типы растительного покрова.

Объекты и методы исследования

В качестве исходных данных для исследования динамики дельты реки Великой использованы спутниковые снимки, полученные с сайта Геологической службы США *USGS GloVis* [USGS, 2025]. Материалами для анализа послужили изображения, полученные со спутников *Landsat 2 (MSS), Landsat 4–5 (TM)* и *Landsat 8 (OLI)* различных лет с минимальной облачностью. Всего было обработано 9 снимков за август–сентябрь 1975, 1988, 1992, 2001, 2006, 2011, 2015, 2020 и 2024 гг.

Выбор снимков именно за август–сентябрь обусловлен тем, что указанный период соответствует фазе устойчивой летне-осенней межени реки Великой, характеризующейся относительно стабильным уровнем воды и минимальным воздействием паводковых

процессов. Это позволяет обеспечить сопоставимость гидрологических условий съёмки в разные годы и, следовательно, повысить достоверность оценки динамики трансформации дельты.

Неравномерность временных срезов объясняется ограниченной доступностью пригодных снимков: в отдельные годы получение качественных снимков затруднено из-за повышенной облачности. В связи с этим изначально предполагаемый пятилетний интервал наблюдений приходилось варьировать, уменьшая или увеличивая шаг между датами съёмок в зависимости от наличия данных с минимальной облачностью.

Все этапы подготовки данных (радиометрическая и атмосферная коррекция), а также последующая их обработка производилась в свободно распространенном программном обеспечении – геоинформационной среде *QGIS 3.28.0* [QGIS, 2025].

Исследование производилось посредством создания индексных изображений – нормализованного разностного индекса воды (*англ. Normalized Difference Water Index – NDWI*) и нормализованного разностного индекса растительности (*англ. Normalized Difference Vegetation Index – NDVI*) [McFeeters, 1996]. Индекс *NDWI* позволяет достоверно определить наличие открытых водных объектов на земной поверхности. Процесс увеличения вегетационного покрытия дельты реки Великой, в частности площади зарастания воздушно-водной растительностью можно оценить с помощью индекса вегетации *NDVI*, который позволяет количественно определить состояние растительности на основе спутниковых данных [Филоненко, Комарова, 2015; Власов и др., 2019; Кутявина и др., 2024].

Для расчёта спектральных индексов использовались каналы: зеленый – B4, B2 и B3 (*Landsat 1, Landsat 5* и *Landsat 8-9* соответственно), красный – B5, B3 и B4 (*Landsat 1, Landsat 5* и *Landsat 8-9* соответственно), ближний инфракасный – B6, B4 и B5 (*Landsat 1, Landsat 5* и *Landsat 8-9* соответственно). Формулы и названия индексов приведены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Используемые каналы и формулы для расчёта *NDVI* и *NDWI* по спутниковым *данным Landsat 1, 5, 8* и *9*
Channels used and formulas for calculating *NDVI* and *NDWI* from *Landsat 1, 5, 8* and *9* satellite data

Спектральный индекс	Формула для расчета		
	Landsat 1	*Landsat 5*	*Landsat 8-9*
NDWI	(B4-B6)/(B4+B6)	(B2-B4)/(B2+B4)	(B3-B5)/(B3+B5)
NDVI	(B6-B5)/(B6+B5)	(B4-B3)/(B4+B3)	(B5-B4)/(B5+B4)

В ходе обработки многовременных спутниковых изображений с использованием водного индекса *NDWI* были получены растровые маски, позволяющие чётко разграничить водную поверхность и участки суши в пределах дельты реки Великой [Silva et al., 2008; Tan et al., 2020]. Для классификации типов поверхности применялся двухэтапный алгоритм, основанный на сочетании индексов *NDWI* и *NDVI*.

На первом этапе по значениям *NDWI* выделялось два класса: (1) открытое водное зеркало и (2) всё прочее – заросли полупогруженной высшей водной растительности и сухопутные растения [Schmidt, Skidmore, 2003; Assegid et al., 2012]. Водная поверхность определялась при $NDWI < 0{,}20$. На втором этапе все пиксели, не относящиеся к открытому водному зеркалу, классифицировались по значениям *NDVI*: (1) заросли полупогруженной высшей водной растительности и (2) сухопутные растения. Разделение между этими классами проводилось по пороговому значению $NDVI = 0{,}29$ [Jaskula, Sojka, 2019; Tan et al., 2020]. Растения, полностью находящиеся под водой, в процессе дешифрирования не выделялись [Бондаренко и др., 2021].

Такой подход позволил достоверно идентифицировать границы островных территорий, а также зафиксировать процессы их фрагментации, объединения и формирования новых островов. Полученные растровые маски были преобразованы в векторный формат для расчёта количественных характеристик, включая площадь островов и динамику береговой линии [Hestir et al., 2015; Pirali Zefrehei et al., 2021; Piloyan, 2023].

Дешифрирование типов растительности на дельтовых островах реки Великой выполнялось методом разделения по пороговым значениям (также обозначаемым термином квантование, *англ. density slicing*) с использованием индекса *NDVI*, отражающего спектральную яркость растительного покрова [Комарова и др., 2016]. Значения *NDVI* были использованы в качестве ключевого критерия для выделения различных классов растительности, включая участки с доминированием тростника, прибрежных гидрофитных сообществ и труднопроходимых заболоченных территорий, характеризующихся высокой биомассой и плотностью растительного покрова. Для классификации использовались следующие пороговые значения *NDVI*: 0,20–0,25 – прибрежные гидрофитные сообщества; 0,25–0,28 – участки с доминированием тростника; > 0,29 – заболоченные территории. Полученные результаты были использованы для оценки пространственного распределения и динамики растительных формаций в пределах дельты.

В гидрологических исследованиях ключевым аспектом является выбор нулевой отметки уровня воды, относительно которой оцениваются все изменения. В ряде исследований, посвящённых анализу динамики зарастания водоёмов и дельты, в качестве нулевой отметки водной поверхности принимается минимальный зафиксированный гидрологический показатель за весь период наблюдений. Такой подход применён, например, в работах зарубежных авторов [Smith et al., 2019; Shang G., Shang Y. , 2020; Xu et al., 2022; Pelckmans et al., 2023;].

Кроме того, в исследованиях широко применяется подход, при котором за нулевую отметку принимают среднюю береговую линию, рассчитанную по разновременным спутниковым/аэрофотоснимкам [Gao et al., 2020; Shiklomanov et al., 2021]. Такой метод позволяет получить «статистическую» границу водной поверхности, устраняя часть краткосрочных колебаний уровня, и часто используется при постройке временных рядов изменений береговой линии и площадей водного зеркала. Однако, имеется ряд минусов при использовании средней береговой линии как нулевой отметки:

1) усреднение скрывает сезонные, годовые и экстремальные колебания уровня – это даёт смещение нулевой отметки по отношению к фактическим гидрологическим режимам и может исказить оценку процессов зарастания, особенно там, где растительность чувствительна к краткосрочным подтоплениям;

2) результат сильно зависит от выбора исходных снимков по времени и качества данных (облачность, разрешение) – при недостаточном и неравномерном временном покрытии усреднённая линия будет смещена;

3) средняя береговая линия отражает не только гидрологию, но и морфодинамику/антропогенные изменения берега (например, осадконакопление), поэтому она может быть неподходящей в динамично изменяющихся дельтах.

Альтернативные методики выбора нулевой отметки уровня воды включают несколько подходов, позволяющих по-разному интерпретировать динамику гидрологического режима. Одним из них является определение нулевой отметки по цифровой модели рельефа (ЦМР) или данным аэрофотосъёмки и лидарной съёмки, что обеспечивает более строгую геодезическую привязку, однако требует высокоточных данных и может быть ограничено их доступностью [Popov et al., 2020; Liu et al., 2021]. В ряде случаев за нулевую отметку принимают границу растительности, которая фиксируется на мультиспектральных снимках и отражает долговременное положение

уровня, достаточного для ограничения произрастания древесно-кустарниковых или луговых сообществ, однако такой метод опосредованно отражает гидрологические процессы и зависит от биотических факторов [Klemas, 2011; Даниличева, Ермаков, 2023]. Кроме того, при наличии гидрологических наблюдений возможно использование комбинированного подхода – привязки дистанционных данных о положении береговой линии к данным водомерных постов или датчиков уровня, что позволяет согласовать временные ряды с конкретными гидрологическими условиями [Vousdoukas et al., 2019]. Таким образом, выбор методики зависит от цели исследования, доступности исходных данных и характера изучаемой акватории.

В нашем исследовании за нулевую отметку принят минимальный зафиксированный уровень воды в период наблюдений за август–сентябрь с 1975 по 2024 гг. – в 155 см. Это решение обусловлено следующими причинами:

– минимальный уровень воды (155 см) представляет собой объективную гидрологическую константу, фиксирующую нижний предел колебаний водности реки;

– использование этого значения в качестве нуля позволяет стандартизировать все измерения за 50-летний период, что критически важно для корректного сравнения данных разных лет;

– позволяет наиболее объективно оценить максимальное обнажение островов и мелей (что важно для анализа роста сухопутной площади) и определить границы распространения водно-болотной растительности (тростник, гидрофиты), которая особенно чувствительна к снижению уровня воды и подтоплению.

Для построения ЦМР дна дельты реки Великой использовались точки глубин, полученные с помощью *GPS*-эхолота *Garmin Striker Plus 4* с двухлучевым трансдьюсером, что обеспечило высокую точность пространственной привязки данных. Создание ЦМР осуществлялось в среде *QGIS* с применением инструмента *SAGA Multilevel B-Splines*, позволившего выполнить интерполяцию данных глубин с сохранением детальности мелкомасштабных форм рельефа. На основе полученной ЦМР выполнялось моделирование векторного слоя затопления при нулевом уровне воды, соответствующем отметке 155 см для стандартизации многолетних измерений и оценки максимального обнажения островных и мелководных участков с использованием гидродинамической модели *HEC-RAS 6.3.1* [HEC-RAS, 2025]. Модельные данные были конвертированы в геопространственные слои и интегрированы в *QGIS*.

Построение графических изображений (графики, гистограммы) и статистическая обработка данных выполнялась в *MS Excel*.

Результаты и их обсуждение

Анализ многолетних спутниковых данных за период 1975–2024 гг. с использованием водного индекса *NDWI* позволил выявить выраженные пространственно-временные изменения в пределах дельты реки Великой. Установлены устойчивые тенденции к увеличению как количества, так и площади островов, обусловленные преимущественно аккумулятивными процессами и зарастанием акватории водной растительностью. За почти полувековой интервал зафиксированы процессы образования новых островов, трансформация береговой линии, увеличение площади отдельных островных участков. Пространственно-временной анализ, выполненный на основе векторизованных данных, показал, что суммарная площадь островов в пределах дельты возросла на 0,63 км², что составляет около 8,6 % от их общей площади на начальный момент исследования. Полученные результаты свидетельствуют о выраженной тенденции к аккумуляции и зарастанию (табл. 2).

Таблица 2
Table 2

Изменение площади островов в дельте р. Великой за 1975–2024 гг.
в абсолютных и относительных величинах
Changes in the area of islands in the Velikaya River delta in 1975–2024 in absolute and relative terms

Общая площадь островов, км^2		Увеличение площади островов в 2024 г. относительно 1975 г.	
1975 г.	2024 г.	км^2	%
7,31	7,94	0,63	8,6

Анализ динамики площади островов в дельте реки Великой за период 1975–2024 гг. выявил волнообразный характер изменений при общей положительной тенденции роста суши. На графике прослеживаются чередующиеся фазы увеличения и снижения площади островов, что обусловлено комплексным воздействием природных факторов, регулирующих процессы аккумуляции и размыва (рис. 1). Одним из ключевых факторов является гидрологическая изменчивость: в годы с пониженным уровнем воды, характерные для засушливых периодов, обнажаются отмели и усиливается аккумуляция наносов, тогда как в полноводные фазы наблюдается частичный размыв берегов и временное подтопление низинных островов. Важно подчеркнуть, что для обеспечения корректности анализа сопоставления выполнялись по данным августа–сентября – месяцев устойчивой летней межени реки Великой. Именно в этот период уровенный режим наиболее стабилен и репрезентативен для оценки реальных площадей островов. Сравнение данных различных лет за другие месяцы (например, май и август) могло бы привести к искажённым выводам из-за сезонной неустойчивости уровня воды в весенне-половодный период. Динамика наносов, переносимых рекой в виде взвешенных частиц, также оказывает влияние: осаждение может происходить в зонах замедленного течения, формируя новые участки суши, в то время как резкие гидрологические колебания, вызванные, например, ливневыми паводками, могут провоцировать их разрушение. Дополнительным фактором выступают климатические аномалии, включая длительные засушливые или влажные периоды, способствующие соответственно аккумуляции или эрозии. Существенную роль играют и сукцессионные процессы: вновь сформированные острова на ранних стадиях подвержены размыву, но со временем стабилизируются благодаря зарастанию воздушно-водной растительностью (в первую очередь, тростником), что снижает их уязвимость к размыванию. Развитие тростниковых сообществ способствует постепенной стабилизации субстрата – разветвлённая корневая система выполняет функцию естественного каркаса, препятствующего перераспределению наносов. При значительном развитии тростника наблюдается накопление отмершей растительной массы, что сопровождается снижением содержания растворённого кислорода, замедлением водообмена и, как следствие, ускорением процессов аккумуляции, что способствует формированию более устойчивых островных экосистем. Несмотря на цикличность «накопление–размыв», в долгосрочной перспективе преобладают аккумулятивные процессы, что может быть связано с общим снижением скорости течения и увеличением объёмов наносимого материала. Данная картина согласуется с типичными трендами развития дельтовых систем, наблюдаемыми, например, в дельтах Волги, Дуная и Лены [Overeem et al., 2003; Li et al., 2004; Giosan et al., 2014; Richards et al., 2014; Fedorova et al., 2015; Mikhailova, Gorbachova, 2019]. Для более точного прогноза дальнейших изменений необходима интеграция данных по водному стоку, климатическим сценариям и моделирование процессов осадконакопления с использованием гидродинамических моделей.

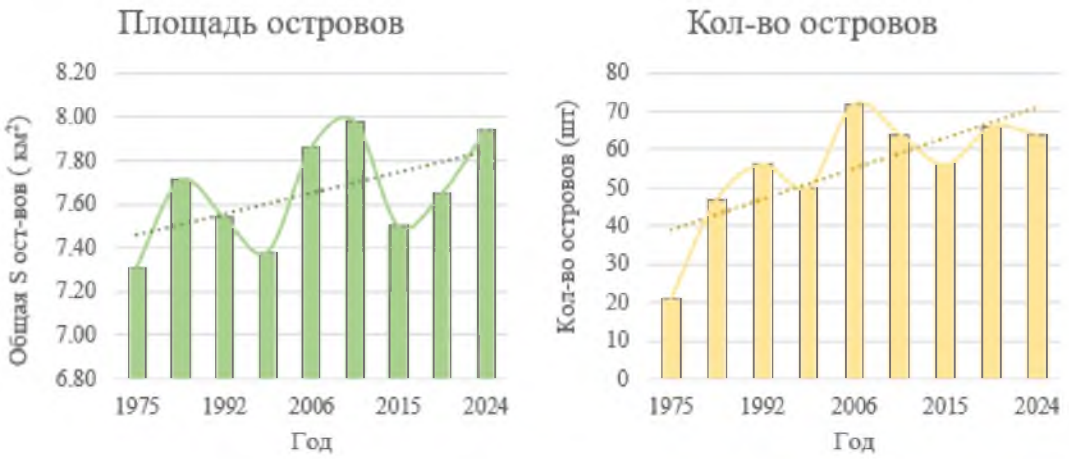

Рис. 1. Динамика количества и площади островов в дельте р. Великой по данным индекса *NDWI*
Fig. 1. Dynamics of the number and area of islands in the Velikaya River delta according to the *NDWI* index

Сопоставление космических снимков дельты реки Великой за 1975 и 2024 гг. свидетельствует о существенной трансформации береговой линии и островных структур за почти 50-летний период (рис. 2).

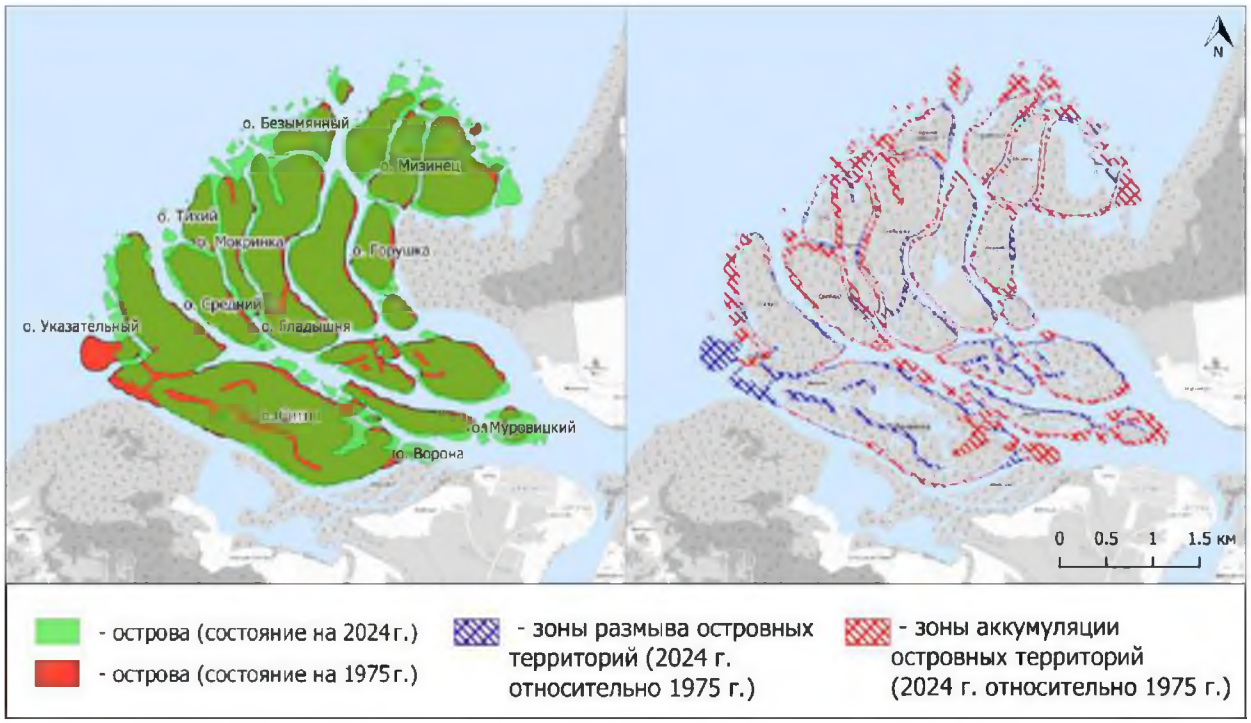

Рис. 2. Изменение конфигурации островов в дельте р. Великой: аккумуляция и размыв островных территорий в 1975 и 2024 гг; в качестве картографической основы использованы данные *OpenStreetMap*
Fig. 2. Changes in the configuration of islands in the Velikaya River delta: accumulation and erosion of island territories in 1975 and 2024; *OpenStreetMap* data used as a cartographic basis

В результате совокупного действия процессов аккумуляции и размыва произошли значительные пространственные изменения: перемещение участков суши, их деструкция, а также формирование новых островных образований. На снимке 1975 г. острова Ситно, и Гладышня представляли собой более крупные и цельные по площади участки суши. К

2024 г. в результате размыва эти острова трансформировались в группы отдельных фрагментов, разделённых мелкими протоками. Так, крайний западный остров дельты – Ситно – в 2024 г. распался на три обособленных острова: Ситно, Подкузовский и Община. У острова Гладышня отделилась южная часть площадью 0,29 км². Протока Тихая, ранее разделявшая острова Тихий и Мокринка (1975 г.), к 2024 г. полностью заросла, что привело к объединению этих островов в единую структуру. Площадь о. Безымянного за исследуемый период увеличилась примерно в 1,5 раза. Общая площадь прироста суши за счёт аккумуляции по сравнению с 1975 г. составила 1,91 км², тогда как площадь размытых территорий – 0,83 км², что на 1,08 км² (56,5 %) меньше. Это свидетельствует о преобладании аккумуляционных процессов над разрушительными в современной динамике островов в дельте р. Великой.

Результаты анализа значений вегетационного индекса *NDVI* за различные периоды времени свидетельствуют о существенном росте растительного покрова в пределах дельтовой системы реки Великой [Ju, Bohrer, 2022]. Зафиксировано почти трёхкратное увеличение площади, охваченной воздушно-водной растительностью, включая тростниковые и гидрофитные сообщества, что указывает на активные процессы зарастания открытых водных пространств. Данный процесс во многом обусловлен аккумуляцией наносов, способствующих постепенному подъёму донной поверхности и формированию благоприятных условий для закрепления макрофитов. Существенную роль играет адаптивные свойства тростника обыкновенного, который способен прорастать на глубинах до 0,7–0,8 м, что совпадает с диапазоном максимального распространения зарастания в дельтовой части р. Великой. Возрастание средних значений *NDVI* по всей территории исследования также подтверждает тенденцию повышения продуктивности и плотности растительности (рис. 3).

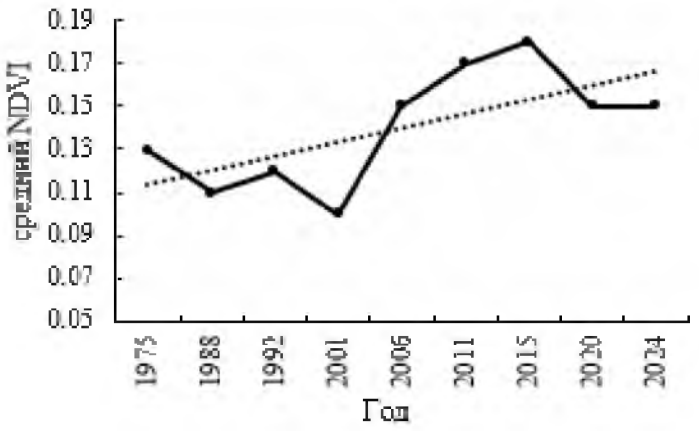

Рис. 3. Динамика среднего значения *NDVI* в дельте р. Великой за период 1975–2024 гг.
Fig. 3. Dynamics of the average *NDVI* value in the Velikaya River delta for the period 1975–2024

Увеличение средних значений *NDVI*, зафиксированное при анализе спутниковых данных за исследуемый период, может быть обусловлено совокупным воздействием природных и антропогенных факторов. Повышенные значения индекса свидетельствуют о росте биомассы и плотности растительного покрова, в том числе воздушно-водной растительности, особенно в пределах прибрежных и заболоченных участков дельты (рис. 4). Дополнительным механизмом выступает формирование и намыв подводных гряд, которые создают благоприятные условия для прорастания тростника. По мере его закрепления донная поверхность становится более мелководной, а прибрежные территории, занятые тростниковыми сообществами, приобретают повышенную устойчивость к размыву вследствие уплотнения донных отложений.

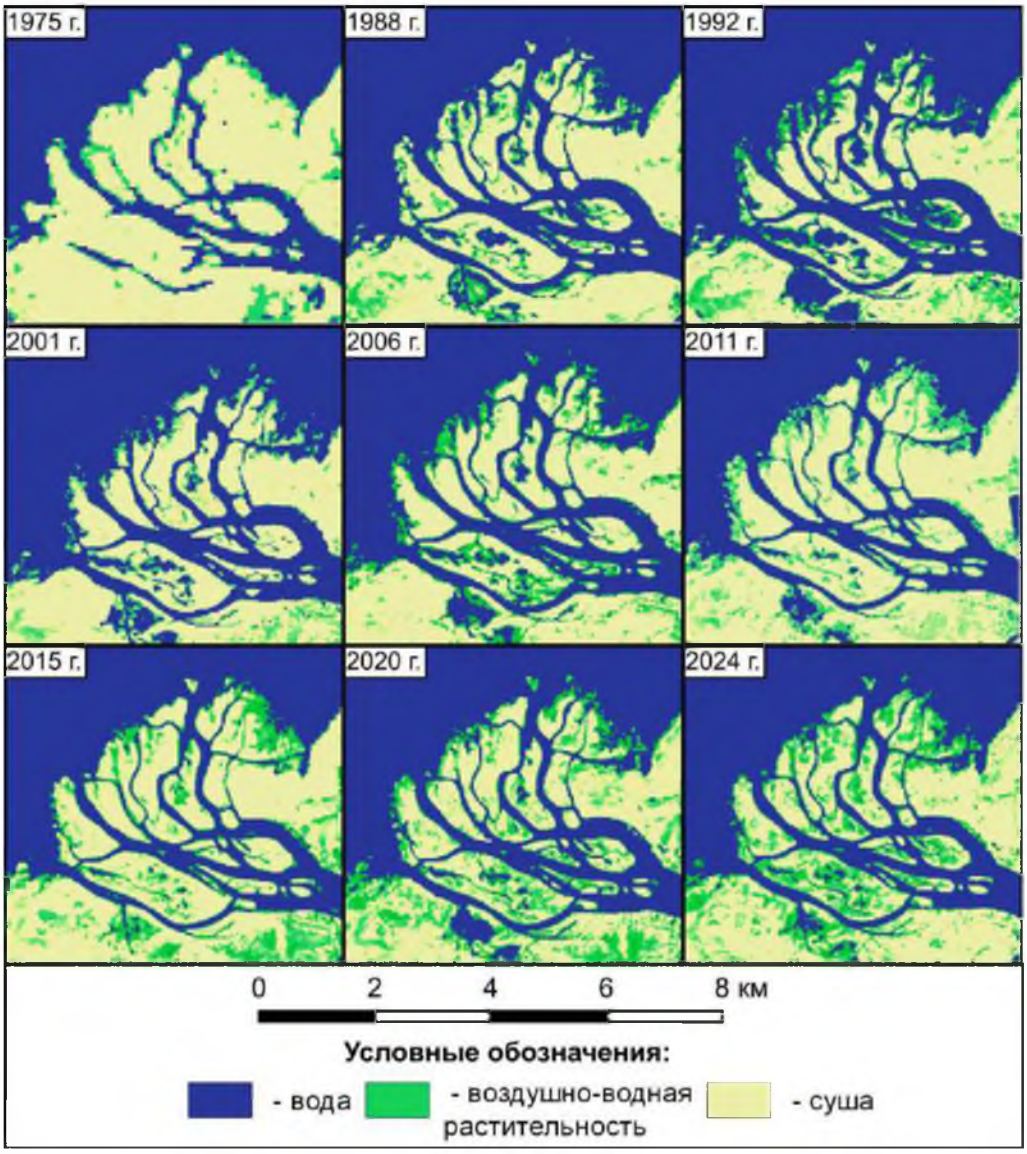

Рис. 4. Динамика воздушно-водной растительности в дельте р. Великой по данным *NDVI* за период 1975–2024 гг.
Fig. 4. Dynamics of aerial and aquatic vegetation in the Velikaya River delta according to *NDVI* data for the period 1975–2024

Рост вегетационного индекса, также может быть связан с изменениями климатических условий, помимо увеличения среднегодовой температуры, на Северо-Западе России (в Псковской области), в последние годы отмечается несоответствие календарных сезонов года фактическому ходу температур и смене времён года. Наблюдаются периоды «смещения» месяцев, к зимнему или к летнему сезону года, вследствие чего получаются сжатые периоды межсезонья. Например, в последние годы можно наблюдать сжатую, быструю, динамичную весну и достаточно продолжительное лето, начинающееся с мая месяца. Также наблюдается продолжительная осень, в последнее время включающая в себя бесснежный декабрь [Евдокимов, Михалап, 2014]. Как следствие, продолжительное лето, перетекающее в теплую, продолжительную осень, удлиняет вегетационный период и накопления биомассы. В свою очередь, изменение фитомассы тростника обыкновенного в течение вегетационного периода имеет определенные тренды и зависит от климатической зоны и трофности водоема [Латышев, 2013].

Значение степени зарастания определяли как отношение площади зарастания к площади зеркала воды при минимальном уровне и относили к определенному классу согласно методике Папченкова [Панюкова и др., 2022].

В.Г. Папченков выделяет 8 классов водоёмов: 1) не заросшие или почти не заросшие – площадь зарослей менее 1 % от площади акватории; 2) очень слабо заросшие – 1–5 %; 3) слабо заросшие – 6–10 %; 4) умеренно заросшие – 11–25 %; 5) значительно заросшие – 26–40 %; 6) сильно заросшие – 41–65 %; 7) очень сильно заросшие – 66–95 %; 8) сплошь заросшие – 96–100 % [Папченков, 2001; Кочеткова и др., 2022].

Исследования, проведённые с использованием спутниковых снимков *Landsat*, показывают, что степень зарастания дельты р. Великой с 1975 по 2024 гг. увеличилась на 18,9 % (рис. 5).

Рис. 5. Изменение степени зарастания растительностью в дельте р. Великой в 1975–2024 гг.
Fig. 5. Changes in the degree of vegetation overgrowth in the Velikaya River Delta in 1975–2024

Согласно классификации степени зарастания, предложенной А.С. Папченковым, периоды 1975–2001 и 2015–2020 гг. в пределах островов дельты реки Великой характеризуются как умеренно заросшие, тогда как 2006–2011 и 2024 год отнесены к классу значительно заросших. Подобная непостоянная динамика зарастания обусловлена сочетанием гидрологических режимов и климатических факторов, характерных для дельтовых экосистем.

В первую очередь, варьирующаяся степень зарастания может быть связана с колебаниями уровня воды в Чудско-Псковском водоёме, влияющими на степень подтопления островов. В периоды высокой водности и устойчивого половодья береговая эрозия сдерживает распространение растительности, тогда как в засушливые годы формируются благоприятные условия для укоренения тростника и других гидрофитов.

Во-вторых, температурные и климатические тренды последних десятилетий (потепление, удлинение вегетационного периода) также способствуют активному росту высшей водной растительности.

Таким образом, волнообразный характер изменений степени зарастания отражает комплексное влияние гидрометеорологических условий и естественной динамики растительных сообществ, особенно выраженной в дельтовых экосистемах.

На основе результатов дешифрирования типов растительности, выявлены значительные трансформации в структуре растительного покрова дельтовых островов реки Великой за период 1988–2024 гг. (табл. 3). Снимок за 1975 год был исключён из классификации из-за низкого пространственного разрешения, не позволяющего обеспечить сопоставимость с данными последующих лет.

Таблица 3
Table 3

Сравнение площадей различных типов растительности в дельте реки Великой в 1988 и 2024 гг.
Comparison of the areas of different types of vegetation in the Velikaya River delta in 1988 and 2024

Растительность	Площадь, км²		Прирост/убыль площади	
	1988	2024	1988	2024
			км²	%
Тростник	4,53	3,52	1,01	–22,30
Гидрофиты	2,10	0,33	1,77	–84,29
Непроходимые болота с тростником	1,39	4,44	3,05	219,42

Классификация спектральной яркости позволила различить основные типы растительности заросли тростника, полупогруженную водную растительность (гидрофиты) и непроходимые заболоченные участки с тростником. Анализ показал сокращение площади тростниковых сообществ на 1,01 км² (–22,3 %), что может быть связано с изменением гидрологического режима, в том числе снижением уровня воды и уменьшением продолжительности затопления, а также с началом процессов сукцессионной трансформации, при которых тростниковые заросли вытесняются болотными сообществами. Аналогично, зафиксировано уменьшение площади полупогруженной водной растительности на 0,33 км², что, вероятно, связано с ухудшением гидрологических условий, заилением русловых участков и конкуренцией с другими типами растительности. В то же время наблюдается увеличение площади непроходимых болот с тростником, что указывает на общее направление сукцессии – от открытых водных экосистем к болотным (рис. 6).

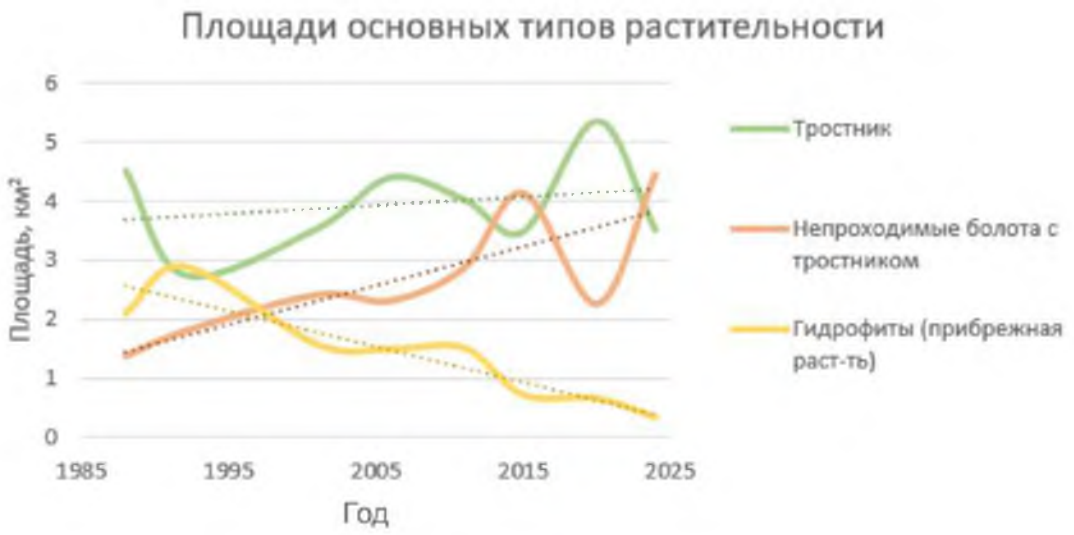

Рис.6. Динамика площадей основных типов растительности в дельте р. Великой по результатам полуавтоматической классификации (1988–2024 гг.)
Fig. 6. Dynamics of the areas of the main vegetation types in the Velikaya River delta according to the results of semi-automatic classification (1988–2024)

Такой переход, по всей видимости, обусловлен как климатическими сдвигами (увеличение осадков, снижение испарения), так и постепенным заболачиванием вследствие накопления органического материала и обмеления территорий. Эти изменения

демонстрируют тесную взаимосвязь между растительностью и гидрологическими условиями, а также свидетельствуют о смещении экосистемного баланса в сторону устойчивого заболачивания.

Установленные изменения в растительном покрове и динамике дельты реки Великой свидетельствуют о нарастающих сукцессионных и аккумулятивных процессах, отражающих общие тенденции к заболачиванию и росту суши. Эти трансформации оказывают комплексное воздействие на структуру экосистемы, биологическое разнообразие и гидрологическое функционирование территории, требуя регулярного мониторинга.

Заключение

Проведённый пространственно-временной анализ трансформации дельты реки Великой за период 1975–2024 гг. на основе данных дистанционного зондирования позволил выявить устойчивые тенденции к росту суши и зарастанию акватории. Установлено, что в результате преимущественно аккумулятивных и сукцессионных процессов происходит формирование новых островов, увеличение их площади, а также постепенная трансформация открытых водных пространств в участки, занятые растительностью. За почти 50-летний период суммарная площадь островов увеличилась на 0,63 км² (8,6 %), что свидетельствует о преобладании процессов аккумуляции над эрозией.

Результаты расчёта вегетационного индекса *NDVI* подтвердили существенный рост растительного покрова, включая воздушно-водные и болотные сообщества, что указывает на активные процессы зарастания и повышение плотности растительности в пределах дельтовой системы. При этом степень зарастания дельты за исследуемый период возросла на 18,9 %, что соответствует переходу от умеренно к значительно заросшему типу по классификации А.С. Папченкова. Наблюдаемая волнообразная динамика зарастания обусловлена сочетанием природных факторов, включая колебания уровня воды и климатические тренды.

Дешифрование типов растительности методом разделения по пороговым значениям показало, что при сокращении площадей тростниковых и гидрофитных сообществ происходит значительное увеличение болотных формаций, характеризующихся высокой плотностью биомассы. Это отражает общее направление экологических изменений – от открытых водных биотопов к заболоченным экосистемам, что может быть связано как с естественным сукцессионным развитием, так и с изменениями гидрологического режима.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой уязвимости дельтовой системы к внешним воздействиям, что обуславливает необходимость организации регулярного мониторинга дельты р. Великой и, при необходимости, реализации регулирующих мероприятий, включающих расчистку и углубление протоков, направленных на поддержание гидрологической устойчивости.

Список источников

HEC-RAS. Электронный ресурс. URL: https://hydroschool.org/hec-ras/ (дата обращения: 14.05.2025).
QGIS. Электронный ресурс. URL: http://www.qgis.org/ru/site/ (дата обращения: 28.01.2025).
USGS. Электронный ресурс. URL: https://glovis.usgs.gov/ (дата обращения: 20.01.2025).

Список литературы

Бондаренко Л.Г., Кульба С.Н., Петрашов В.И., Смирнов С.С., Матвеева Е.И., Рудакова Н.А. 2021. Оценка зарастания водной растительностью Челбасской группы азовских лиманов. Водные биоресурсы и среда обитания, 4(4): 14–26. https://doi.org/10.47921/2619-1024_2021_4_4_14

Власов Б.П., Грищенкова Н.Д., Сивенков А.Ю., Суховило Н.Ю., Колбун Д.А. 2019. Оценка современного состояния и динамики зарастания озер Национального парка «Нарочанский» с использованием данных дистанционного зондирования Земли. Acta Geographica Silesiana, 13(4(36)): 39–55.

Даниличева О.А., Ермаков С.А. 2023. О проявлениях биогенных плёнок на спутниковых мультиспектральных изображениях эвтрофированного водоёма. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 20(5): 273–284. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-5-273-284

Евдокимов С.И., Михалап С.Г. 2014. Дифференциация времён года по среднемесячным показателям температур. В кн.: Проблемы устойчивости эколого-хозяйственных и социально-культурных систем трансграничных регионов. Материалы международной научно-практической конференции, Псков, 20–21 ноября 2014. Псков, ЛОГОС Плюс: 173–176.

Комарова А.Ф., Журавлева И.В., Яблоков В.М. 2016. Открытые мультиспектральные данные и основные методы дистанционного зондирования в изучении растительного покрова. Принципы экологии, 1(17): 42–80.

Кочеткова А.И., Брызгалина Е.С., Филиппов О.В., Баранова М.С. 2022. Динамика зарастания Волгоградского водохранилища (1972–2018 гг.). Принципы экологии, 1(43): 68–73. https://doi.org/10.15393/j1.art.2022.10002

Кутявина Т.И., Рутман В.В., Ашихмина Т.Я. 2024. Оценка динамики зарастания высшими водными растениями акватории эвтрофного водохранилища с использованием спутниковых изображений. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 21(1): 299–307. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-1-299-307

Латышев С.Э. 2013 Изменение фитомассы тростника обыкновенного в течение вегетационного сезона в разнотипных озерах Белорусского Поозерья. В кн.: Наука – образованию, производству, экономике. Материалы XVIII (65) Регион. науч.-практ. конф. преподавателей, науч. сотрудников и аспирантов, Витебск, 13–14 марта 2013. Витебск, ВГУ имени П.М. Машерова: 97–100.

Лебедева О.А. 2006. Экосистема дельты реки Великой и ее влияние на Псковско-Чудское озеро. Псковский регионологический журнал, 1: 107–121.

Михалап С.Г. 2018. Исследование динамики зарастания дельты реки Великой методами ДЗЗ. В кн.: Вклад особо охраняемых природных территорий в экологическую устойчивость регионов: Современное состояние и перспективы. Материалы всероссийской (с международным участием) конференции, Кологрив, 20–21 сентября 2018. Кологрив, Государственный природный заповедник "Кологривский лес" им. М.Г. Синицына: 138–141.

Михалап С.Г., Михайлова К.Б. 2018. Зарастание дельты реки Великой макрофитами на основании данных полевых исследований и ДЗЗ. В кн.: Экологический мониторинг и биоразнообразие. Материалы Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции, Ишим, 25–26 декабря 2018. Ишим, Изд-во ИПИ им. П.П. Ершова (филиала) ТюмГУ: 66–69.

Михалап С.Г., Михайлова К.Б., Дрозденко Т.В. 2018. Современное состояние экосистемы дельты реки Великой и оценка ее аквакультурного потенциала. Вестник Псковского государственного университета. Серия: Естественные и физико-математические науки, 13: 16–25.

Панюкова Е.В. Тетерюк Б.Ю., Панюков А.А. 2022. Характеристика и продуктивность сообществ гидрофитов малых водохранилищ Европейского Северо-Востока России. Russian Journal of Ecosystem Ecology, 7(1): 22–32. https://doi.org/10.21685/2500-0578-2022-1-3

Папченков В.Г. 2001. Растительный покров водоемов и водотоков Среднего Поволжья. Ярославль, ЦМП МУБиНТ, 200 с.

Филоненко И.В., Комарова А.С. 2015. Многолетняя динамика площади зарастания прибрежно-водной растительностью оз. Воже. Принципы экологии, 4(16): 63–72.

Экологический мониторинг дельты реки Великой. 2003. Под ред. О.А. Лебедевой. Псков, ПГПИ, 156 с.

Assegid Y., Naja G., Rivero R.G., Melesse A.M. 2012. Water Quality Monitoring Using Remote Sensing and an Artificial Neural Network. Water Air Soil Pollut, 223: 4875–4887. https://doi.org/10.1007/s11270-012-1243-0

Fedorova I.V., Bolshiyanov D.Y., Makarov A.S. 2015. Geomorphological Evolution and Sedimentation Processes in the Lena River Delta. Earth Cryosphere, 9(1): 3–12.

Gao J., Jia Y., Wang Z. 2020. Multi-Year Water Level Variation and Shoreline Dynamics in Poyang Lake Using Landsat and Hydrological Data. Journal of Hydrology, 589: 125–196.

Giosan L., Syvitski J., Constantinescu S., Day J. 2014. Climate Change: Protect the World's Deltas. Nature, 516: 31–33. https://doi.org/10.1038/516031a

Hestir E.L., Brando V.E., Bresciani M., Giardino C., Matta E., … Dekker A.G. 2015. Measuring Freshwater Aquatic Ecosystems: The Need for a Hyperspectral Global Mapping Satellite Mission. Remote Sensing of Environment, 167: 181–195. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.05.023

Jaskula J., Sojka M. 2019. Assessing Spectral Indices for Detecting Vegetative Overgrowth of Reservoirs. Polish Journal of Environmental Studies, 28(6): 4199–4211. https://doi.org/10.15244/pjoes/98994

Ju Y., Bohrer G. 2022. Classification of Wetland Vegetation Based on NDVI Time Series from the HLS Dataset. Remote Sensing, 14(9): 2107. https://doi.org/10.3390/rs14092107

Klemas V. 2011. Remote Sensing Techniques for Studying Coastal Ecosystems: an Overview. Journal of Coastal Research, 27(1): 2–17. https://doi.org/10.2307/25790484

Li B., Chen J., Yin Y. 2004. Accretion and Progradation in the Modern Volga Delta, Russia. Quaternary International, 120: 135–144.

Liu Y., Chen Y., Zhang Q. 2021. Integrating UAV and LiDAR Data for Precise Shoreline Extraction of Inland Lakes. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 176: 268–280.

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

Mikhailova M.V., Gorbachova L.V. 2019. Modern Evolution of the Danube River Delta Coastline Under Anthropogenic Impact. Water Resources, 46(6): 693–703.

Overeem I., Syvitski J.P.M., Hutton E.W.H. 2003. Quantitative Modeling of River Delta Formation Under Changing Climate and Sea Level. Proceedings of the International Conference on Volga Delta Evolution: 58–74.

Pelckmans L., Temmerman S., Balke T. 2023. Hydrodynamic Drivers of Mangrove Expansion: a Modelling Study in a Tide-Dominated Delta. Natural Hazards and Earth System Sciences, 23: 415–430. https://doi.org/10.5194/nhess-23-415-2023.

Piloyan A. 2023. Assessing Spatio-temporal Changes of Floating Aquatic Vegetation in Lake Sevan Using Landsat Imagery and Vegetation Indices. International Journal of Geoinformatics, 19(11): 1–11. https://doi.org/10.52939/ijg.v19i11.2913

Pirali Zefrehei A.R., Fallah M., Hedayati A. 2021. Applying Remote Sensing Techniques to Changes of Water Body and Aquatic Plants in Anzali International Wetland (1985–2018). Theoretical and Applied Ecolog, 1: 65–72. https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-1-065-072

Popov A., Makarov A., Sokolov P. 2020. Application of LiDAR-Derived DEMs for Shoreline Change Analysis in Large Lakes. Remote Sensing Letters, 11(2): 185–194.

Richards K., Panin A., Golosov V. 2014. Volga River: a Summary of Morphological Change. Geomorphology, 215: 138–151.

Schmidt K.S., Skidmore A.K. 2003. Spectral Discrimination of Vegetation Types in a Coastal Wetland. Remote Sensing of Environment, 85(1): 92–108. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00196-7

Shang G., Shang Y. 2020. Wetland Vegetation Response to Water Level Fluctuations in the Poyang Lake, China. Ecological Indicators, 110. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105933.

Shiklomanov A., Lammers R., Rawlins M. 2021. Hydrological Reference Datums in Large Arctic Rivers: Approaches and Uncertainties. Hydrology and Earth System Sciences, 25(9): 5003–5019.

Silva T.S.F., Costa M.P.F., Melack J.M., Novo E.M.L.M. 2008. Remote Sensing of Aquatic Vegetation: Theory and Applications. Environmental Monitoring and Assessment, 140: 131–145. https://doi.org/10.1007/s10661-007-9855-3

Smith J.A., Brown M.E., Jackson C. 2019. Vegetation Response to Minimum Water Levels in the Atchafalaya Delta, USA. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 224: 123–134. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.04.006.

Tan W., Xing J., Yang S., Yu G., Sun P., Jiang Y. 2020. Long-Term Aquatic Vegetation Dynamics in Longgan lake Using Landsat Time Series and Their Responses to Water Level Fluctuation. Water, 12(8): 2178. https://doi.org/10.3390/w12082178

Vousdoukas M.I., Mentaschi L., Voukouvalas E., Verlaan M., Jevrejeva S., … Feyen L. 2019. Global Probabilistic Projections of Extreme Sea Levels Show Intensification of Coastal Flood Hazard. Nature Communications, 9: 2360. https://doi.org/10.1038/s41467-018-04692-w

Xu K., Milliman J.D., Yang Z., Xu H. 2022. Temporal and Spatial Variability of Sediment Discharge in the Yellow River Basin (China): Climate and Human Impact. Global and Planetary Change, 90(3): 231–247. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.02.015.

References

Bondarenko L.G., Kulba S.N., Petrashov V.I., Smirnov S.S., Matveeva E.I., Rudakova N.A. 2021. Assessment of Overgrowth of the Chelbas Group of the Azov Sea Limans with Aquatic Vegetation. Aquatic Bioresources & Environment, 4(4): 14–26 (in Russian). https://doi.org/10.47921/2619-1024_2021_4_4_14

Vlasov B.P., Grishchenkova N.D., Sivenkov A.Yu., Sukhovilo N.Yu., Kolbun D.A. 2019. Assessment of the Current State and Dynamics of the Overgrowing of Lakes in National Park "Narochansky" Using Remote Sensing Data. Acta Geographica Silesiana, 13(4(36)): 39–55 (in Russian).

Danilicheva O.A., Ermakov S.A. 2023. On Biogenic Film Manifestations in Satellite Multispectral Images of Eutrophic Water Bodies. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 20(5): 273–284 (in Russian). https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-5-273-284

Evdokimov S.I., Mikhalap S.G. 2014. Differentsiatsiya vremen goda po srednemesyachnym pokazatelyam temperatur [Differentiation of Seasons According to Monthly Average Temperatures]. In: Problemy ustoychivosti ekologo-khozyaystvennykh i sotsialno-kulturnykh sistem transgranichnykh regionov [Problems of Sustainability of Ecological, Economic and Socio-Cultural Systems of Cross-Border Regions]. Proceedings of the international scientific and practical conference, Pskov, 20–21 November 2014. Pskov, Pabl. LOGOS Plus: 173–176.

Komarova A.F., Zhuravleva I.V., Yablokov V.M. 2016. Open-Source Multispectral Remote Sensing Data for the Investigation of Plant Communities. Principles of the Ecology, 1(17): 42–80 (in Russian).

Kochetkova A.I., Bryzgalina E.S., Filippov O.V., Baranova M.S. 2022. Dynamics of Overgrowth of the Volgograd Reservoir (1972-2018). Principles of the Ecology, 1(43): 68–73 (in Russian). https://doi.org/10.15393/j1.art.2022.10002

Kutyavina T.I., Rutman V.V., Ashikhmina T.Ya. 2024. Evaluation of the Dynamics of Overgrowth of Higher Aquatic Plants in the Water Area of an Eutrophic Reservoir Using Satellite Images. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space, 21(1): 299–307 (in Russian). https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-1-299-307

Latyshev S.E. 2013. Izmeneniye fitomassy trostnika obyknovennogo v techeniye vegetatsionnogo sezona v raznotipnykh ozerakh Belorusskogo Poozeria [Changes in the Phytomass of Common Reed During the Growing Season in Different Types of Lakes in the Belorussian Poozerye]. In: Nauka – obrazovaniyu. proizvodstvu. ekonomike [Science for Education, Production, and the Economy]. Materials of the XVIII (65) Regional Scientific and Practical Conference of Teachers and Researchers. Proceedings of the Conference of Employees and Postgraduate Students, Vitebsk, 13–14 March 2013. Vitebsk, Pabl. Vitebsk State University named after P.M. Masherov: 97–100.

Lebedeva O.A. 2006. Ekosistema delty reki Velikoy i eye vliyaniye na Pskovsko-Chudskoye ozero [The Velikaya River Delta Ecosystem and Its Impact on Lake Peipus]. Pskovskiy regionologicheskiy zhurnal, 1: 107–121.

Mikhalap S.G. 2018. Researching of Overgrowth Dynamics of the Velikaya River Delta. In: The Contribution of Specially Protected Natural Areas to Regional Environmental Sustainability: Current Status and Prospects. Proceedings of the All-Russian (with International Participation) Conference, Kologriv, 20–21 September 2018. Kologriv, Pabl. Gosudarstvennyy prirodnyy zapovednik "Kologrivskiy les" im. M.G. Sinitsyna: 138–141 (in Russian).

Mikhalap S.G., Mikhailova K.B. 2018. Overgrowing of the Delta of the River Velikaya by Macrophites on the Basis of Data of Field Research and Radar Imaging of the Earth. In: Environmental Monitoring and Biodiversity. Proceedings of the All-Russian (with International Participation) Scientific and Practical Conference, Ishim, 25–26 December 2018. Ishim, Pabl. IPI im. P.P. Ershova (filiala) TyumGU: 66–69 (in Russian).

Mikhalap S.G., Mikhaiova K.B., Drozdenko T.V. 2018. The Present State of the Velikaya River Delta and Assessment of Its Aquacultural Potential. Bulletin of the Pskov State University. Series "Natural and physical and mathematical sciences", 13: 16–25 (in Russian).

Panyukova E.V. Teteruk B.Yu., Panyukov A.A. 2022. Characteristics and Productivity of Hydrophite Communities of Small Reservoirs of the European North-East of Russia. Russian Journal of Ecosystem Ecology, 7(1): 22–32 (in Russian). https://doi.org/10.21685/2500-0578-2022-1-3

Papchenkov V.G. 2001. Rastitelnyy pokrov vodoyemov i vodotokov Srednego Povolzhia [Vegetation Cover of Reservoirs and Watercourses of the Middle Volga Region]. Yaroslavl, Pabl. TsMP MUBiNT, 200p.

Filonenko I.V., Komarova A.S. 2015. Long-Term Dynamics of Overgrowing Area with Coastal Aquatic Vegetationin in the Lake Vozhe. Principles of the Ecology, 4(16): 63–72 (in Russian).

Ekologicheskiy monitoring delty reki Velikoy [Environmental Monitoring of the Velikaya River Delta]. 2003. Ed. by O.A. Lebedeva. Pskov, Pabl. PGPI, 156 p.

Assegid Y., Naja G., Rivero R.G., Melesse A.M. 2012. Water Quality Monitoring Using Remote Sensing and an Artificial Neural Network. Water Air Soil Pollut, 223: 4875–4887. https://doi.org/10.1007/s11270-012-1243-0

Fedorova I.V., Bolshiyanov D.Y., Makarov A.S. 2015. Geomorphological Evolution and Sedimentation Processes in the Lena River Delta. Earth Cryosphere, 9(1): 3–12.

Gao J., Jia Y., Wang Z. 2020. Multi-Year Water Level Variation and Shoreline Dynamics in Poyang Lake Using Landsat and Hydrological Data. Journal of Hydrology, 589: 125–196.

Giosan L., Syvitski J., Constantinescu S., Day J. 2014. Climate Change: Protect the World's Deltas. Nature, 516: 31–33. https://doi.org/10.1038/516031a

Hestir E.L., Brando V.E., Bresciani M., Giardino C., Matta E., … Dekker A.G. 2015. Measuring Freshwater Aquatic Ecosystems: The Need for a Hyperspectral Global Mapping Satellite Mission. Remote Sensing of Environment, 167: 181–195. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.05.023

Jaskula J., Sojka M. 2019. Assessing Spectral Indices for Detecting Vegetative Overgrowth of Reservoirs. Polish Journal of Environmental Studies, 28(6): 4199–4211. https://doi.org/10.15244/pjoes/98994

Ju Y., Bohrer G. 2022. Classification of Wetland Vegetation Based on NDVI Time Series from the HLS Dataset. Remote Sensing, 14(9): 2107. https://doi.org/10.3390/rs14092107

Klemas V. 2011. Remote Sensing Techniques for Studying Coastal Ecosystems: an Overview. Journal of Coastal Research, 27(1): 2–17. https://doi.org/10.2307/25790484

Li B., Chen J., Yin Y. 2004. Accretion and Progradation in the Modern Volga Delta, Russia. Quaternary International, 120: 135–144.

Liu Y., Chen Y., Zhang Q. 2021. Integrating UAV and LiDAR Data for Precise Shoreline Extraction of Inland Lakes. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 176: 268–280.

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

Mikhailova M.V., Gorbachova L.V. 2019. Modern Evolution of the Danube River Delta Coastline Under Anthropogenic Impact. Water Resources, 46(6): 693–703.

Overeem I., Syvitski J.P.M., Hutton E.W.H. 2003. Quantitative Modeling of River Delta Formation Under Changing Climate and Sea Level. Proceedings of the International Conference on Volga Delta Evolution: 58–74.

Pelckmans L., Temmerman S., Balke T. 2023. Hydrodynamic Drivers of Mangrove Expansion: a Modelling Study in a Tide-Dominated Delta. Natural Hazards and Earth System Sciences, 23: 415–430. https://doi.org/10.5194/nhess-23-415-2023.

Piloyan A. 2023. Assessing Spatio-temporal Changes of Floating Aquatic Vegetation in Lake Sevan Using Landsat Imagery and Vegetation Indices. International Journal of Geoinformatics, 19(11): 1–11. https://doi.org/10.52939/ijg.v19i11.2913

Pirali Zefrehei A.R., Fallah M., Hedayati A. 2021. Applying Remote Sensing Techniques to Changes of Water Body and Aquatic Plants in Anzali International Wetland (1985–2018). Theoretical and Applied Ecolog, 1: 65–72. https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-1-065-072

Popov A., Makarov A., Sokolov P. 2020. Application of LiDAR-Derived DEMs for Shoreline Change Analysis in Large Lakes. Remote Sensing Letters, 11(2): 185–194.

Richards K., Panin A., Golosov V. 2014. Volga River: a Summary of Morphological Change. Geomorphology, 215: 138–151.

Schmidt K.S., Skidmore A.K. 2003. Spectral Discrimination of Vegetation Types in a Coastal Wetland. Remote Sensing of Environment, 85(1): 92–108. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00196-7

Shang G., Shang Y. 2020. Wetland Vegetation Response to Water Level Fluctuations in the Poyang Lake, China. Ecological Indicators, 110. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105933.

Shiklomanov A., Lammers R., Rawlins M. 2021. Hydrological Reference Datums in Large Arctic Rivers: Approaches and Uncertainties. Hydrology and Earth System Sciences, 25(9): 5003–5019.

Silva T.S.F., Costa M.P.F., Melack J.M., Novo E.M.L.M. 2008. Remote Sensing of Aquatic Vegetation: Theory and Applications. Environmental Monitoring and Assessment, 140: 131–145. https://doi.org/10.1007/s10661-007-9855-3

Smith J.A., Brown M.E., Jackson C. 2019. Vegetation Response to Minimum Water Levels in the Atchafalaya Delta, USA. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 224: 123–134. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.04.006.

Tan W., Xing J., Yang S., Yu G., Sun P., Jiang Y. 2020. Long-Term Aquatic Vegetation Dynamics in Longgan lake Using Landsat Time Series and Their Responses to Water Level Fluctuation. Water, 12(8): 2178. https://doi.org/10.3390/w12082178

Vousdoukas M.I., Mentaschi L., Voukouvalas E., Verlaan M., Jevrejeva S., … Feyen L. 2019. Global Probabilistic Projections of Extreme Sea Levels Show Intensification of Coastal Flood Hazard. Nature Communications, 9: 2360. https://doi.org/10.1038/s41467-018-04692-w

Xu K., Milliman J.D., Yang Z., Xu H. 2022. Temporal and Spatial Variability of Sediment Discharge in the Yellow River Basin (China): Climate and Human Impact. Global and Planetary Change, 90(3): 231–247. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.02.015.

Поступила в редакцию 01.10.2025;
поступила после рецензирования 17.11.2025;
принята к публикации 08.12.2025

Received October 01, 2025;
Revised November 17, 2025;
Accepted December 08, 2025

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.
Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Евдокимов Сергей Игоревич, кандидат географических наук, доцент кафедры географии, Псковский государственный университет, г. Псков, Россия

Штефуряк Алина Викторовна, специалист лаборатории водных биоресурсов, Псковский филиал ФГБНУ ГНЦ РФ «ВНИРО» («ПсковНИРО»), г. Псков, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey I. Evdokimov, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor of the Department of Geography, Pskov State University, Pskov, Russia

Alina V. Shtefuryak, Specialist of the Laboratory of Aquatic Bioresources, Pskov Branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution of the National Research Center of the Russian Federation VNIRO (PskovNIRO), Pskov, Russia