

УДК 528.854.4

## **РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА ДЕШИФРИРОВАНИЯ КРУПНЫХ БОЛОТНЫХ КОМПЛЕКСОВ КАРЕЛЬСКОГО ПЕРЕШЕЙКА ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ**

**О. В. Артемьева\* , Н. А. Позднякова, И. А. Флоринский**

*Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле  
(Университетская наб., 7-9, Санкт-Петербург, Россия, 199034), \*o.artemieva@spbu.ru*

Технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) открывают широкие возможности для исследований в различных областях, позволяя оперативно изучать обширные территории. Применение данных ДЗЗ активно внедряется в систему управления территориями и способствует сохранению целостности природных комплексов. Особую сложность для анализа представляют болотные ландшафты, характеризующиеся высокой пространственной неоднородностью, динамичностью во времени и сходством спектральных характеристик с другими типами растительности. В статье рассматриваются возможности использования данных ДЗЗ для определения контуров болотных массивов методами автоматизированного дешифрирования. В статье представлены разработка и описание оптимального алгоритма автоматизированного распознавания крупных болотных систем, обеспечивающего надежное выявление границ этих природных объектов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью создания эффективных алгоритмов оперативной дифференциации болотных комплексов на значительных территориях, что позволит сократить объемы трудоемких полевых исследований. Важно отметить, что в научной литературе до сих пор отсутствуют универсальные методики дешифрирования обширных болотных территорий. Исследование проводилось в восточной части Всеволожского района Ленинградской области – регионе, характеризующемся активным хозяйственным освоением, включающим не только расширение городской и сельской застройки, но и строительство кольцевых автомобильных и железнодорожных магистралей. Выбранная территория представляет особый интерес благодаря разнообразию болотных ландшафтов и уникальным природным особенностям региона, включающего более 40 особо охраняемых природных территорий, развитую транспортную сеть и объекты культурного наследия. Авторами разработан алгоритм выявления границ болотных систем, охватывающих несколько болотных массивов. Теоретическая значимость работы заключается в исследовании возможностей применения методов автоматизированной классификации и данных спутникового дистанционного зондирования для изучения обширных болотных ландшафтов. Практическая ценность исследования состоит в проведении сравнительного анализа методов автоматизированной классификации, что может быть полезно для последующих экологических, биогеографических, болотоведческих исследований и упрощения процесса создания геоботанических карт.

Ключевые слова: автоматизированное дешифрирование; Ленинградская область; Карельский перешеек; данные дистанционного зондирования; космические снимки; болота

Для цитирования: Артемьева О. В., Позднякова Н. А., Флоринский И. А. Разработка и исследование алгоритма дешифрирования крупных болотных комплексов Карельского перешейка Ленинградской области // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 1. С. 44–55. doi: 10.17076/eco1982

**O. V. Artemeva\*, N. A. Pozdnyakova, I. A. Florinskii. DEVELOPMENT AND STUDY OF AN ALGORITHM FOR DECODING LARGE MIRE MASSIFS OF THE KARELIAN ISTHMUS, LENINGRAD REGION**

*Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences (7-9 Universitetskaya Nab., 199034 St. Petersburg, Russia), \*o.artemieva@spbu.ru*

Remote sensing technologies open up wide opportunities for research in various fields, allowing for a rapid study of vast territories. The use of remote sensing data is being actively introduced into territorial management systems, helping preserve the integrity of natural ecosystems. Mires are particularly challenging to analyze, as they are characterized by high spatial heterogeneity, temporal dynamism, and similarity of spectral characteristics with other types of vegetation. This article examines the potential of using automated interpretation of remote sensing data to delineate wetland areas. We undertook to develop and describe an optimal algorithm for automated recognition of large mire landscapes and reliable delineation of these natural features. The relevance of this study stems from the need to develop effective algorithms for rapidly differentiating mires out of large areas, and thus save on labor-intensive fieldwork. It is important to note that the scientific literature still lacks universal methods for interpreting large areas of mire landscapes. The study was conducted in the eastern part of the Vsevolozhsk District of the Leningrad Region – an area characterized by active economic development, including not only the expansion of urban and rural communities, but also the construction of ring roads and railways. The selected area is of particular interest due to the diversity of its mire ecosystems and unique natural features, which include more than 40 protected areas, a ramified transportation network, and cultural heritage sites. The authors have developed an algorithm for identifying the boundaries of wetland systems encompassing several mire areas. The theoretical significance of this study lies in exploring the potential of automated classification methods and satellite imagery for studying large areas of mire landscapes. Its practical value consists in conducting a comparative analysis of automated classification methods, which could be useful for subsequent ecological, biogeographical, and wetland studies and for simplifying the process of creating geobotanical maps.

Keywords: automated interpretation; Leningrad Region; Karelian Isthmus; remote sensing data; satellite imagery; mires

For citation: Artemeva O. V., Pozdnyakova N. A., Florinskii I. A. Development and study of an algorithm for decoding large mire massifs of the Karelian Isthmus, Leningrad Region. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 1. P. 44–55. doi: 10.17076/eco1982

## **Введение**

Болота – природные образования, представляющие собой переувлажненные участки земной поверхности со слоем торфа и специфическими формами растительности, приспособившимися к условиям избытка влаги, слабой проточности и недостатку кислорода. Они являются одними из важнейших природных объектов, как для человека, так и для природы в целом. Болотные экосистемы питают подземные водоносные горизонты, выступают важнейшими продуцентами кислорода, производя его иногда больше, чем леса, в то же время поглощая больше углекислого газа, становясь тем самым настоящими

«легкими планеты». Они очищают воду, регулируют режим рек, поглощают большое количество вредных веществ. В них происходит формирование такого полезного ископаемого, как торф, который имеет широкое применение: в энергетике, сельском хозяйстве, химической промышленности, медицине [Ильсов и др., 2019]. Болота являются местообитанием множества ценных и редких видов флоры и фауны. Данные экосистемы влияют на планирование территорий: без знания их расположения и характеристик невозможно рационально воспользоваться землями с минимальным ущербом для природных комплексов, вместе с тем получив максимальную выгоду [Aaviksoo et al., 1997].

Важно различать болота и заболоченные территории. Во-первых, болота имеют специфическую растительность, приспособившуюся к их характерным особенностям: малой проточности, недостатку кислорода, избыточной влаге. Во-вторых, в большинстве случаев они имеют слой торфа, превышающий 30–50 см, чего не наблюдается, например, в заболоченных лесах. Однако существуют пойменные болота, в которых торфонакопление отсутствует в связи с периодическим повышением мощности аллювия и делювия, и, например, болота степной и пустынной зон, где торфообразованию мешает быстрый распад растительных остатков из-за сухого воздуха и высоких температур [Ниценко, 1967].

В научной литературе существуют различные термины, описывающие участки земной поверхности, занятые болотными экосистемами. Единства среди авторов-болотоведов нет. Понятие «болото» употребляется в весьма широком смысле. Его используют, описывая данные экосистемы, к примеру, по типу питания: «верховое болото», «переходное болото». Однако болотом также называют и каждое отдельное угодье как участок земли, являющийся объектом хозяйственного использования или пригодный для этой цели. Также часто используется аналогичный по своей сути термин «болотный массив»: участок поверхности, занятый болотом, границы которого представляют собой отдельный контур. Авторами были исследованы природные системы, которые следует трактовать как «болото» в классическом смысле термина. При этом рассмотрению подверглись большие по площади образования, зачастую представляющие собой несколько слившихся массивов, то есть можно говорить об исследовании «болотных систем», имеющих сложную, комплексную структуру, или крупных болотных комплексов. Таким образом, в данной работе термин «болотный комплекс» используется в более широком понимании, чем принято в работах в области болотоведения, где он обозначает сочетание двух или более растительных ассоциаций, фитоценозы которых имеют определенную приуроченность к элементам микрорельефа, когда они мозаично чередуются друг с другом, создавая при этом своеобразный пятнистый ландшафт [Ниценко, 1967; Денисенков, 2000]. Учитывая возможный интерес к данной разработке широкого круга пользователей – работников, занятых в сельскохозяйственном производстве, строительстве, которые не имеют специальных знаний в науках о Земле, обработке ДДЗ и в узкоспециализированной терминологии, авторы будут

придерживаться использования и в названии, и в самой работе термина «болотный комплекс» в близком с «болотной системой» значении.

Вся исследуемая территория находится в пределах Восточно-Европейской равнины, в северо-западной ее части находится граница Русской платформы и Балтийского щита. С запада омывается водами Финского залива Балтийского моря, в центре частично заходит на территорию области крупнейшее озеро Европы – Ладожское. Гидрографическая сеть очень густая, здесь располагается большое количество небольших рек и ручьев. Также протекают такие крупные реки, как Нева, Волхов, Свирь, Вуокса, Луга. Климат умеренный континентальный, гумидный. Все эти условия способствуют образованию болотных систем, которые встречаются повсеместно.

Карельский перешеек – территория, расположенная между Финским заливом и Ладожским озером, с юга ограниченная Невой, а с севера – линией, соединяющей бухту Защитную близ Выборга и залив Пеконлахти, самую западную точку Ладожского озера. Включает в себя Всеволожский, Приозерский и основную часть Выборгского района Ленинградской области, Калининский, Приморский, Курортный, Выборгский, Красногвардейский районы с правобережной частью Невского района Санкт-Петербурга и юго-западную часть Республики Карелия в районе поселка Хийтола. На данной территории находится множество болот различного генезиса, исследования которых имеют значительную историю [Абрамова, 1963; Доронина и др., 2020; Смагин, Бойчук, 2021].

Все болота в научной литературе по типу питания подразделяются на следующие категории:

1. Низинные (эвтрофные). Они расположены в понижениях рельефа, характерной растительностью является ольха, береза, осока, тростник и рогоз. Насыщение водой в основном происходит за счет подземных водных источников. Характеризуются питанием водами с высоким содержанием минеральных солей.

2. Переходные (мезотрофные). Они получают питание как из атмосферных осадков, так и из подземных источников. Характерная растительность – береза, сосна, осоки, сфагновые мхи.

3. Верховые (олиготрофные). Эта группа, как правило, расположена на водоразделах, вода обладает резкой кислотностью, питание происходит в основном за счет атмосферных осадков. Характерная растительность – сосна, пушица, кустарнички, сфагновые мхи. Питание водами с низким содержанием минеральных солей [Ниценко, 1967].

На Карельском перешейке преобладают олиготрофные болота (более 60 % площади), мезотрофные занимают до 25 %, а эвтрофные практически не сохранились из-за сельскохозяйственного освоения и торфоразработок [Трасс и др., 1963; Доронина и др., 2020]. В настоящее время наблюдается процесс повторного заболачивания заброшенных участков.

Помимо типа питания на дифференциацию болот также влияют различные геоморфологические особенности местности, окружающей болото, и другие географические факторы. Для большинства болот можно выделить общие характеристики, помогающие в определении данных природных объектов по спутниковым снимкам.

Для дальнейшего рационального использования больших по площади земель необходимо знать все морфологические характеристики территории. В связи с этим возникает вопрос с определением границ крупных болотных массивов, в то время как большинство исследований направлены на дешифрирование структуры лишь в пределах одного болотного контура [Казаков, 2013; Зраенко, 2016; Крутских и др., 2018].

В настоящем исследовании авторы предлагают рассмотреть алгоритм дешифрирования крупных болотных массивов на участке к северо-востоку от Санкт-Петербурга во Всеволожском районе Ленинградской области (рис. 1).

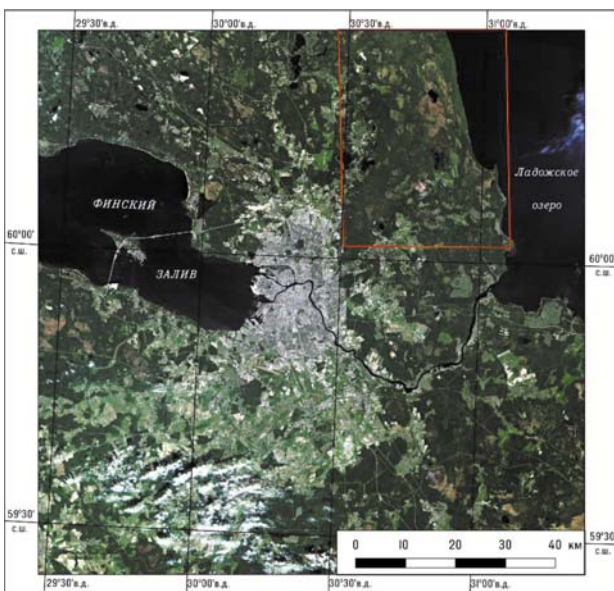


Рис. 1. Исследуемая территория на космическом снимке в естественных цветах [Copernicus...]

Fig. 1. The study area on a satellite image in natural colors [Copernicus...]

Исследуемый участок является весьма характерной территориальной выборкой из всего Карельского перешейка: разнообразие ландшафтов, наличие всех характерных типов болот, присутствие на территории таких значимых болотных систем, как Волеярвское, Лепсарское, Нясинское и Красное болота. Предложенные алгоритмы могут быть использованы для всей территории перешейка, а также южных и центральных частей Республики Карелия. Исследование проводилось различными алгоритмами автоматизированного дешифрирования с использованием инструментов соответствующих модулей в программных продуктах QGIS и ArcGIS Pro.

## Материалы и методы

Предлагаемые алгоритмы проведения дешифрирования болот по спутниковым снимкам включают в себя следующие этапы обработки ДДЗ: предварительная обработка, проведение классификации и оценка точности.

**Предварительная обработка.** На первом этапе проведен сбор и подготовка исходных данных. В работе использовались космические снимки Sentinel-2, полученные 17 июня 2023 г. при облачности менее 10 %. Пространственное разрешение составило 10 м в диапазонах видимого и ближнего инфракрасного излучения. Для анализа были выбраны четыре канала, которые обеспечивают наибольшую информативность при дифференциации болотных и прилегающих ландшафтов [Медведева и др., 2019]. Характеристики используемых каналов представлены в табл. 1.

Все данные импортированы в программный продукт QGIS. Для работы задействованы модули DZetsaka и Semi-Automatic Classification Plugin (SCP). Плагин SCP, являясь инструментом с открытым исходным кодом, предоставляет возможности для контролируемой классификации и кластеризации изображений, а также их предварительной и постобработки [Github...]. Он поддерживает работу с данными спутниковых систем Sentinel, ASTER, Landsat и MODIS.

Поскольку использовались снимки уровня L2A, радиометрическая коррекция и атмосферная коррекция были уже выполнены поставщиком данных. Для повышения достоверности классификации снимок был обрезан по векторному слою-маске.

Район исследования расположен к северо-востоку от Санкт-Петербурга и к северу от Всеволожска. Его северная граница определена краем снимка вблизи границы Всеволожского и Приозерского районов, восточная – акваторией

Таблица 1. Основные характеристики используемых каналов спутниковой системы Sentinel-2

Table 1. The main characteristics of the channels used in the Sentinel-2 satellite system

Каналы Sentinel-2 Sentinel-2 channels	Средняя длина волны, мкм Average wavelength, $\mu\text{m}$	Пространственное разрешение, м Spatial resolution, m
2 – Голубой (BLUE)	0,490	10
3 – Зеленый (GREEN)	0,560	10
4 – Красный (RED)	0,665	10
8 – Ближний инфракрасный (NIR (Near InfraRed))	0,842	10

Ладожского озера. Участок характеризуется высокой концентрацией разнообразных болотных массивов при относительно низкой антропогенной нагрузке, что делает его репрезентативным для задач дешифрирования.

Для эффективной классификации и визуализации результатов критически важен выбор оптимальной комбинации спектральных каналов [Schowengerdt, 2007]. С помощью инструмента «Определить объекты» в QGIS проанализированы спектральные характеристики пяти основных природных классов: вода, лес, сельскохозяйственные угодья, болота и открытые поверхности (почва, грунт). Для каждого класса отобрано по 15 эталонных участков в разных частях снимка. Установлено, что болота наиболее контрастно отделяются от других объектов в синем (BLUE) и зеленом (GREEN) диапазонах. Результаты измерений представлены в табл. 2.

На основе анализа для классификации выбрана комбинация каналов 2-3-8 (GREEN-BLUE-NIR) (рис. 2), которая показала наибольшую информативность для дифференциации болот. Дополнительно создано изображение, включающее все четыре канала (8-3-4-2) [Дюкарев и др., 2008], что позволяет учесть комплексность болот как природных объектов. Болота, будучи переувлажненными территориями, характеризуются специфическим отражением в инфракрасном диапазоне: наличие

воды снижает отражение, а растительный покров, в свою очередь, повышает его, позволяя отделить болота от водных объектов.

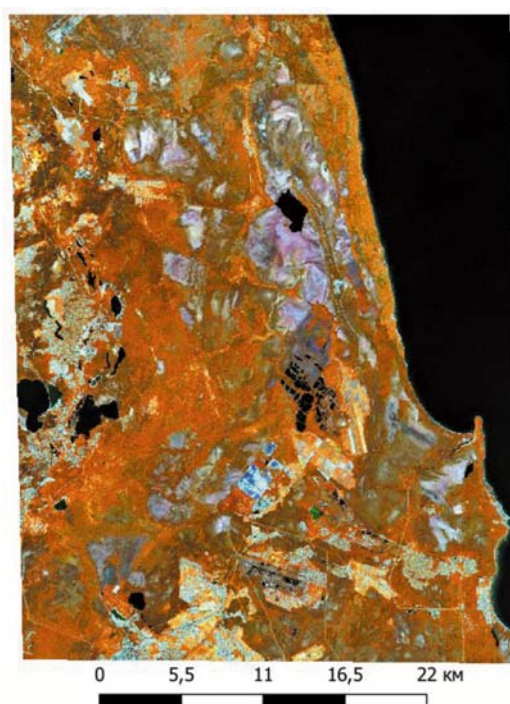


Рис. 2. Комбинация GREEN-BLUE-NIR  
Fig. 2. Combination GREEN-BLUE-NIR

Таблица 2. Значения яркости объектов некоторых классов в различных спектральных диапазонах

Table 2. Brightness values of objects of some classes in different spectral range

Спектральный диапазон Spectral range	BLUE	GREEN	RED	NIR
Вода Water	1294,23	1319,38	1224,77	1178,38
Лес Forest	1287,85	1441,08	1273,46	3569,69
Болото Wog	1486,82	1751,85	1898,31	4311,54
Сельскохозяйственные угодья Agricultural land	1588,00	1870,38	1846,23	4358,15
Торф Peat	1361,15	1472,23	1589,31	2556,31

Для анализа растительности применен нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), рассчитываемый по формуле (1) и отражающий количество фотосинтетически активной биомассы [Новохатин, Казаков, 2012]:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}. \quad (1)$$

Значения индекса варьируют от  $-1$  до  $1$ . Расчет основан на двух наиболее стабильных участках спектральной кривой отражения сосудистых растений. В красной области спектра ( $0,6-0,7$  мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасной ( $0,7-1$  мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листа. Другими словами, высокая фотосинтетическая активность ведет к меньшему отражению в красной области спектра и большему в инфракрасной. Отношение этих показателей позволяет четко определять и анализировать растительные объекты. Использование именно нормализованной разности, а не простого отношения, увеличивает точность измерения, позволяет уменьшить влияние облачности, дымки, поглощения атмосферой радиации и прочих [Лабутина, Балдина, 2013].

Для оценки влажности почв использован нормализованный дифференциальный водный индекс (NDWI), вычисляемый по формуле (2):

$$NDWI = \frac{GREEN-NIR}{GREEN+NIR}. \quad (2)$$

Значения индекса варьируют от  $-1$  до  $1$ . Данный индекс широко применяется в сельскохозяйственном мониторинге и исследованиях лесных экосистем [Иннотер...].

**Проведение классификации.** Классификация выполнялась двумя методами: с обучением (контролируемая) и без обучения (неконтролируемая).

Для лучшего понимания того, какие классы целесообразно выделить при классификации, применена неконтролируемая кластеризация с помощью плагина SCP, поддерживающего алгоритмы K-Means и Iso Data. Суть подхода заключается в автоматическом разделении пикселей на группы (кластеры), количество которых, спектральные свойства и наименования заранее неизвестны. Пиксели объединяются в те или иные кластеры на основании схожести спектральных характеристик.

Для обоих методов кластеризации можно задать количество создаваемых кластеров, итераций и способы вычисления расстояния между пикселями: Minimum Distance или Spectral Angle Mapping. Количество итераций задавалось 1000

и не изменялось, в то время как число классов было выставлено 6, 8, 10 и 12. Таким образом, получено 16 классифицированных изображений, при этом использовалось только четырехканальное изображение. Сравнивая их визуально, можно прийти к выводу, что алгоритм минимальных расстояний (Minimum Distance) не подходит для данной цели, так как результаты классификаций не соответствуют выделяемым природным объектам, а в некоторых случаях создано меньшее количество классов, чем необходимо. Метод Iso Data во всех случаях дал классификацию низкого качества. Наиболее точные результаты получили при классификации методом K-Means, используя способ вычисления расстояний между пикселями Spectral Angle Mapping по 10 классам. Определив оптимальный путь получения кластеров, приняли решение провести контролируемую классификацию, создав изображение из 10 классов: водных объектов, лесных массивов, сельскохозяйственных угодий, населенных пунктов, карьеров и открытых поверхностей торфа, сфагновых сосняков, сфагновых болот, обводненных участков болот и осоково-травяных болот.

Контролируемая классификация проводилась на основе заранее размеченных данных (обучающих выборок), собранных с эталонных участков для каждого класса объектов [Зраенко, 2016]. В нашем случае для повышения точности было принято решение о создании 15–20 полигонов для каждого класса. Для этого создали векторный полигональный слой (рис. 3).



Рис. 3. Участок с обучающими выборками  
Fig. 3. A plot with training samples

Класс сфагновых болот был разбит на несколько подклассов, так как состоял из объектов с различными показателями яркости, а затем всем подклассам был присвоен единый цвет. Классификация реализована при помощи модуля Dzetsaka, в котором автоматически предустановлен метод модели гауссовой смеси. Особенностью обработки данного модуля является получение итогового результата в виде растрового изображения, которое в дальнейшем можно экспортировать в различные программы. Для проведения контролируемой классификации были выбраны все четыре созданных ранее изображения: комбинации 2-3-8, 8-3-4-2, NDVI и NDWI.

**Оценка точности.** Точность получившихся классификаций можно оценивать разными способами. Первоначально это можно сделать визуальным способом, сравнивая классифицированные изображения с результатами экспертного дешифрирования. Более формализованный подход – использование матриц ошибок (или матриц несоответствий). Данный метод заключается в том, что выбор контрольных точек в пределах классифицированного участка отбирается автоматически. Точки, как правило, равномерно распределены и каждой присваивается класс, соответствующий значению пикселя в классифицированном изображении, на который она попадает. Затем фактический класс контрольных точек сравнивается с классом, присвоенным алгоритмом, и это сравнение формирует матрицу, на основе которой рассчитываются различные показатели точности. Таким образом, матрица ошибок позволяет объективно оценить, насколько

корректно алгоритм классифицировал каждый из классов, выявляя ошибки смешения одного класса с другим.

В исследовании оценку проводили как визуально (сравнивались результаты автоматизированного и полевого дешифрирования с дополнительным использованием тематических карт Всеволожского района Ленинградской области), так и с использованием матриц несоответствий, опираясь на данные торфяного фонда. Оценка точности матрицами несоответствий проводилась в программном продукте ArcGIS Pro. Для этого был создан векторный слой с точками, содержащими информацию о принадлежности их к каким-либо классам (в нашем случае 368 точек). Несоответствия получались за счет того, что автоматически в таблице атрибутов точек было задано значение класса, определенного от пикселя под точкой, а в соседнем столбце присваивалось значение согласно визуальному определению, к какому классу следует отнести данный пунсон. В результате были получены матрицы ошибок, на основании которых и производился поиск наиболее выгодного для проведения автоматизированного дешифрирования болот и заболоченных территорий изображения (рис. 4).

В августе 2023 г. проведены полевые исследования на территории Всеволожского района, в ходе которых идентифицированы и соотнесены со снимками ключевые типы болотных ландшафтов: сфагновые, осоково-травяные, обводненные болота, а также участки с открытым торфом и сфагновые сосняки. Эти данные использованы как эталонные для верификации результатов классификации.

ClassValue,C	C_1,N,19,11	C_2,N,19,11	C_3,N,19,11	C_4,N,19,11	C_5,N,19,11	C_6,N,19,11	C_7,N,19,11
C_1	55,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_2	0,0000000000	101,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	1,0000000000
C_3	4,0000000000	0,0000000000	6,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_4	0,0000000000	2,0000000000	0,0000000000	4,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_5	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	1,0000000000	7,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_6	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	3,0000000000	0,0000000000
C_7	0,0000000000	2,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	12,0000000000
C_8	0,0000000000	6,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_9	0,0000000000	3,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_10	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_11	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_12	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	2,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_13	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_14	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_15	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	1,0000000000	2,0000000000
C_16	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_17	0,0000000000	9,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
C_18	6,0000000000	4,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000000000
Total	65,0000000000	127,0000000000	6,0000000000	7,0000000000	7,0000000000	4,0000000000	15,0000000000
P_Accuracy	0,84615384615	0,79527559055	1,00000000000	0,57142857143	1,00000000000	0,75000000000	0,80000000000
Kappa	0,00000000000	0,00000000000	0,00000000000	0,00000000000	0,00000000000	0,00000000000	0,00000000000

Рис. 4. Фрагмент матрицы несоответствий для классификации по комбинации 8-3-4-2

Fig. 4. A fragment of the discrepancy matrix for classification by combination 8-3-4-2

## Результаты и обсуждение

В ходе исследования разработан алгоритм дешифрирования болотных комплексов и заболоченных территорий по спутниковым снимкам (рис. 5). Алгоритм апробирован на данных миссии Sentinel-2, однако он может быть адаптирован и для использования с другими материалами, обладающими сопоставимыми характеристиками. Этапы обработки в различных программных средах являются схожими.

Наименьшую точность показала классификация на основе нормализованного разностного водного индекса (NDWI). Достоверность определения болот и заболоченных территорий по матрице несоответствий составила 47,5 %. Наблюдались ошибки, такие как ложное определение сфагновых болот в пределах населенных пунктов, отсутствие четкой дифференциации между сфагновыми сосняками и сфагновыми болотами, а также ошибочное отнесение обводненных участков болот к лесным массивам (рис. 6, а).

Классификация по нормализованному разностному вегетационному индексу (NDVI) показала несколько лучший результат с достоверностью 51,8 %. Однако для нее также характерны ошибки: частичное ложное определение сфагновых болот в населенных пунктах, наличие шумового эффекта в зонах сфагновых сосняков (влияние класса сельскохозяйственных угодий) и ошибочная дифференциация сфагновых болот и сосняков в лесных массивах (рис. 6, б).

Классификация по спектральной комбинации каналов 2-3-8 (GREEN-BLUE-NIR) была выполнена с достоверностью 57,6 %. К ее недостаткам можно отнести выраженный шумовой эффект на территориях торфяных разработок (влияние класса населенных пунктов) и частичное ошибочное определение сфагновых болот в селитебных зонах. В то же время контуры болотных массивов в целом соответствуют результатам визуального дешифрирования (рис. 7, а).

Наиболее точные результаты получены при использовании четырехканального изображения (комбинация 8-3-4-2). Достоверность определения болот и заболоченных территорий в этом случае достигла 68,8 % (рис. 7, б). Данный метод позволил хорошо дифференцировать сфагновые сосняки и сфагновые болота. Недостатки включают незначительный шумовой эффект в населенных пунктах и ложное определение части осоково-травяных болот и торфоразработок как сельскохозяйственных угодий.

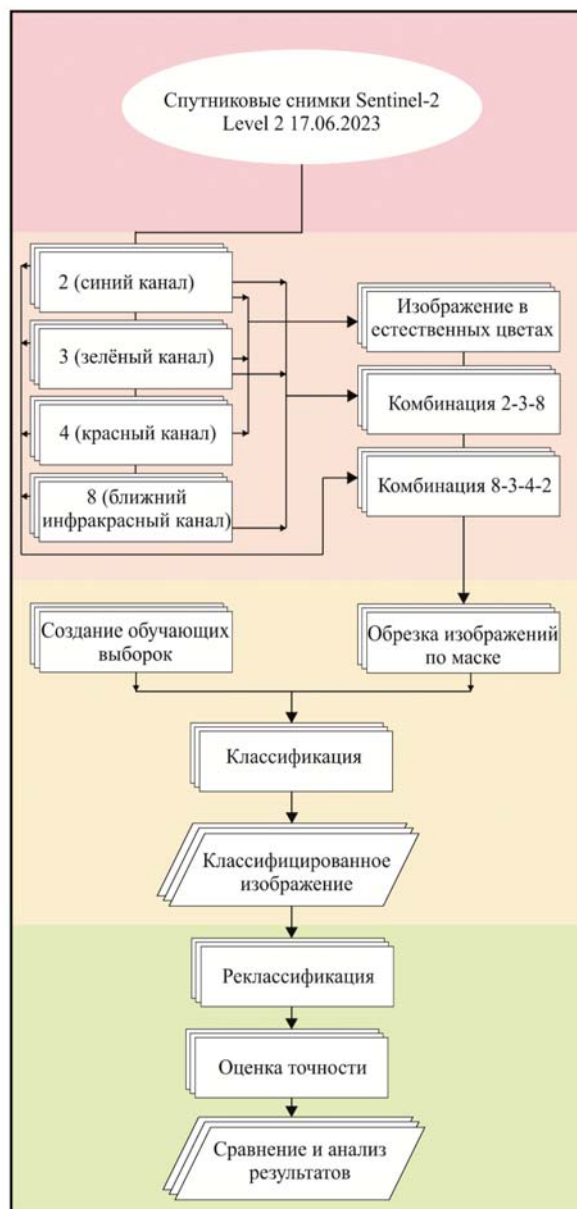


Рис. 5. Блок-схема проведения дешифрирования  
Fig. 5. Block diagram of the decryption algorithm

Таким образом, для сравнения итогов классификаций была использована оценка точности при помощи матрицы несоответствий. Среди выбранных изображений достовернее всего прошла классификация по комбинации, содержащей все четыре использованных канала. Вероятнее всего, это обусловлено тем, что именно она обеспечивает наибольшее количество данных, на основании которых и проводится классификация. Другими словами, болота имеют особенное, по сравнению с другими ландшафтами, отражение в различных диапазонах. К примеру, вода, содержащаяся в болотах, поглощает большее количество

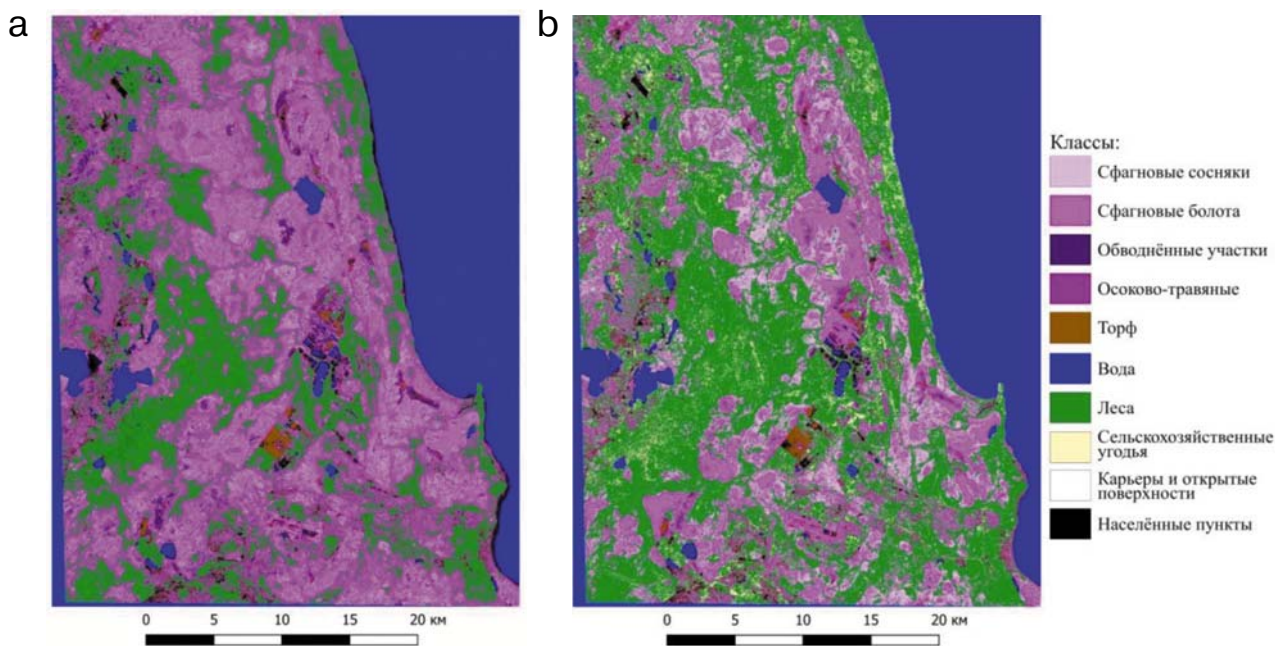


Рис. 6. Результаты классификации (а – по NDWI, б – по NDVI)

Fig. 6. Classification results (a – NDWI, b – NDVI)

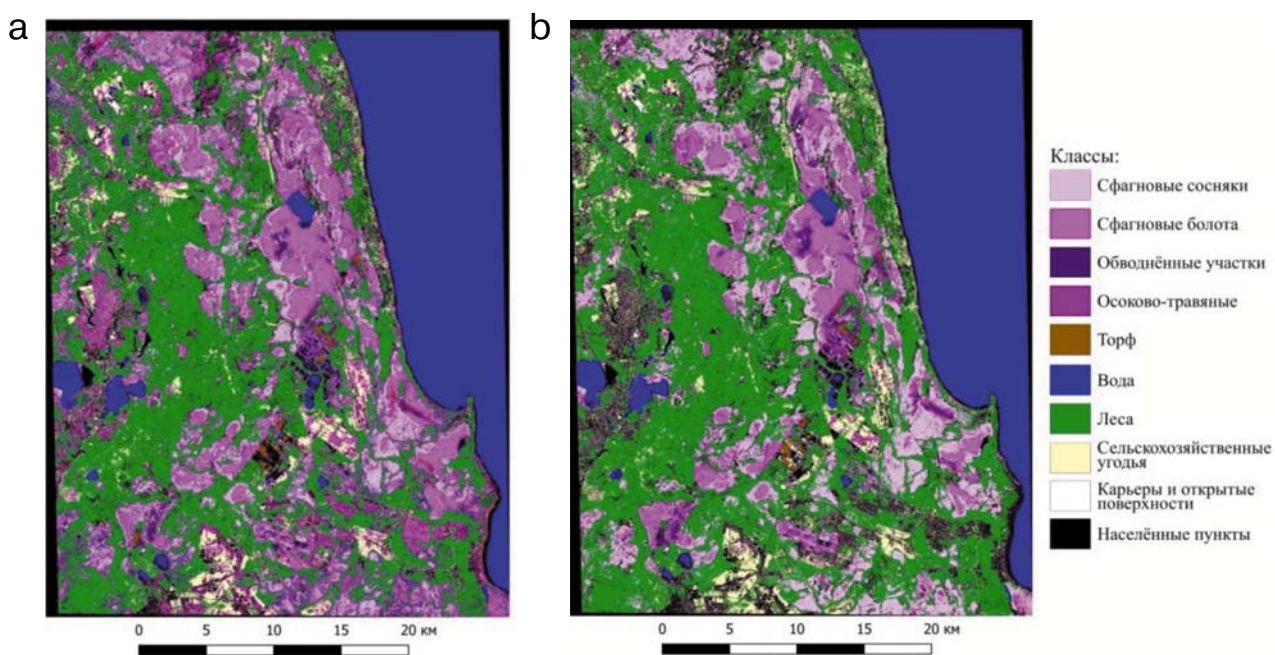


Рис. 7. Результаты классификации (а – по комбинации 2-3-8, б – по комбинации 8-3-4-2)

Fig. 7. Classification results (a – for combination 2-3-8, b – for combination 8-3-4-2)

электромагнитного излучения в инфракрасном диапазоне, чем другие объекты, но в то же время растительный покров, находящийся на болоте, часть этого излучения отражает, однако в меньшем количестве, чем лесные массивы или сельскохозяйственные угодья.

На основе проведенной работы можно выделить следующие ключевые аспекты, которые необходимо учитывать при дешифрировании болот по данным ДЗЗ:

1) Качество исходных данных. Снимки должны иметь минимальную облачность, так как облака

вносят значительные искажения и затрудняют интерпретацию.

2) Качество обучающих выборок. При контролируемой классификации больших территорий корректность создания эталонных полигонов напрямую влияет на результат. Некачественные выборки существенно снижают точность.

3) Вычислительные ресурсы. Для обработки больших массивов данных необходимо обеспечивать достаточный объем оперативной памяти или использовать технологии распределенной обработки.

4) Комплексный подход. Для повышения достоверности следует задействовать максимально широкий набор дешифровочных признаков и спектральных характеристик.

Полевое дешифрирование подтвердило важность создания эталонной коллекции изображений болот с детальным описанием их дешифровочных признаков: формы, размера, цвета, текстуры, структуры и пространственного рисунка. Такая коллекция является основой для корректного выбора эталонных участков и последующей автоматизированной классификации.

## Выводы

На основании проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. Существует практическая необходимость в совершенствовании алгоритмов дешифрирования болот и заболоченных территорий методами дистанционного зондирования Земли. Это позволит ускорить и повысить эффективность принятия решений в различных отраслях народного хозяйства и научных исследованиях. Актуальность данной работы обусловлена наличием на территории Российской Федерации обширных площадей, занятых болотными экосистемами.

2. Ключевой задачей является определение оптимального набора спектральных каналов и диапазонов значений яркости для идентификации различных типов ландшафтов, в частности болот и заболоченных земель. Настоящее исследование вносит вклад в решение этой задачи.

3. Достоверность и точность определения границ объектов классификации в значительной степени зависят от выбора алгоритма классификации.

4. Качество обучающих выборок является критически важным фактором, напрямую влияющим на точность и надежность результатов. Формирование репрезентативных обучающих выборок – один из важнейших этапов автоматизированного дешифрирования крупных болотных массивов.

5. Использование многоканальных мультиспектральных изображений (более трех каналов) повышает точность классификации. В данном исследовании применение четырехканального композита позволило достичь достоверности дешифрирования болот и заболоченных территорий на уровне 68,8 %.

Разработанный в ходе работы алгоритм демонстрирует оптимальный подход к дешифрированию крупных болотных комплексов. Он может быть использован в качестве методической основы для проведения аналогичных исследований не только на территории Ленинградской области, но и в других регионах со схожей структурой земного покрова. Возможность практического применения алгоритма подтверждена данными полевой апробации.

Авторы считают, что научные разработки, направленные на оптимизацию использования земельных ресурсов России, имеют большое значение для будущего развития страны. Проведение фундаментальных и прикладных исследований в этой области является необходимым условием для устойчивого развития государства.

## Литература

Абрамова Т. Г. Типология и районирование болот Карельского перешейка // Ученые записки Тартуского университета. 1963. Вып. 145. Труды по ботанике. VII. С. 181–204.

Денисенков В. П. Основы болотоведения. СПб.: Изд-во СПб ун-та, 2000. 224 с.

Дороница А. Ю., Галанина О. В., Смагин В. А., Орлов Т. В. Болота Лемболовской возвышенности (Ленинградская область) // Ботанический журнал. 2020. Т. 105, № 9. С. 909–918. doi: 10.31857/S0006813620090033

Дюкарев Е. А., Головацкая Е. А., Пологова Н. Н. Технологии дистанционного зондирования для установления структуры лесоболотных комплексов ключевого участка «Бакчарский» // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2008. № 4. С. 334–345.

Зраенко С. М. Исследование алгоритмов обнаружения болот по данным дистанционного зондирования // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КРЫМИКО 2016): Мат-лы 26-й Международной Крымской конференции (Севастополь, 4–10 сентября 2016 года). Т. 11. Севастополь, 2016. С. 2419–2424.

Ильясов Д. В., Сиринов А. А., Макарова Л. Ю., Букин А. В., Кораблина Н. Е. ГИС-картографирование торфяных болот и антропогенно-измененных торфяников Рязанской области // Вестник РГТУ. 2019. № 1. С. 30–38.

Иннотер [Электронный ресурс]. URL: <https://innoter.com/articles/vidy-vodnykh-indeksov-i-ikh-primeneniye/> (дата обращения: 13.04.2023).

Казаков А. А. Дистанционное геотермическое картографирование болот Западной Сибири (на примере Тарманского болотного массива) // Вестник Тюменского государственного университета. 2013. № 4. С. 161–167.

Крутских Н. В., Миронов В. Л., Рязанцев П. А. Использование ГИС-технологий для обеспечения работ по изучению болотных массивов // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2018. Т. 24(1). С. 405–418. doi: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-405-418

Лабутина И. А., Балдина Е. А. Практикум по курсу «Дешифрирование аэрокосмических снимков»: учебное пособие. Географический факультет. М.: МГУ, 2013. 168 с.

Медведева М. А., Возбранная А. Е., Сирин А. А., Маслов А. А. Возможности различных мультиспектральных космических данных для мониторинга неиспользуемых пожароопасных торфяников и эффективности их обводнения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. № 2. С. 150–159. doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-150-159

Ниценко А. А. Краткий курс болотоведения. М.: Высшая школа, 1967. 147 с.

Новохатин В. В., Казаков А. А. Использование данных дистанционного зондирования Земли в оценке процесса вторичного заболачивания осушенных болот Западной Сибири // Вестник Тюменского государственного университета. 2012. № 7. С. 167–173.

Смагин В. А., Бойчук М. А. Болота северо-запада Карельского перешейка (Ленинградская обл.) // Растительность болот: Современные проблемы классификации, картографирования, использования и охраны: Мат-лы IV Междунар. науч. семинара. Минск, 2021. С. 98–101.

Трасс Х., Аллес П., Павел Ю., Перк А. Доклады совещания по геоботаническому исследованию болот северо-запада СССР. Тарту: Тартуск. гос. ун-т, 1963. 352 с.

Aaviksoo K., Kadarik H., Masing V. Kaug-ja lähivõtteid 30 Esti soost. Esimene raamat telmatograafiafiast. Tallinn, 1997.

Copernicus [Электронный ресурс]. URL: <https://browser.dataspace.copernicus.eu> (дата обращения: 09.03.2024).

Github [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/semiautomaticgit/SemiAutomaticClassificationPlugin> (дата обращения: 09.03.2024).

Schowengerdt R. A. Remote sensing: models and methods for image processing. 3<sup>rd</sup> ed. Amsterdam: Elsevier; Burlington: Academic Press, 2007. 515 p.

## References

Abramova T. G. Typology and zoning of mires of the Karelian Isthmus. *Uchenye zapiski Tartuskogo universiteta = Proceedings of the University of Tartu. Works on Botany. VII.* 1963;145:181–204. (In Russ.)

Aaviksoo K., Kadarik H., Masing V. Aerial views and close-up pictures of 30 Estonian mires. The first book on telmatography, Tallinn; 1997. (In Eston.)

Copernicus. URL: <https://browser.dataspace.copernicus.eu> (accessed: 09.03.2024).

Denisenkov V. P. Fundamentals of swamp science. St. Petersburg: SPb un-t; 2000. 224 p. (In Russ.)

Doronina A. Yu., Galanina O. V., Smagin V. A., Orlov T. V. Bogs of the Lembolovskaya Upland (Leningrad Region). *Botanicheskii zhurnal = Botanic Journal.* 2020;105(9):909–918. (In Russ.). doi: 10.31857/S0006813620090033

Dyukarev E. A., Golovatskaya E. A., Pologova N. N. Remote sensing technologies for establishing the structure of forest-swamp complexes of the key Bakcharsky site. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technology.* 2008;4:334–345. (In Russ.)

Github. URL: <https://github.com/semiautomaticgit/SemiAutomaticClassificationPlugin> (accessed: 09.03.2024).

Il'yasov D. V., Sirin A. A., Makarova L. Yu., Bukin A. V., Korablina N. E. GIS mapping of natural and human-disturbed peatlands in the Ryazan Region. *Vestnik RGATU = Bulletin of RSAU.* 2019;1:30–38. (In Russ.)

Innoter. (In Russ.). URL: <https://innoter.com/articles/vidy-vodnykh-indeksov-i-ikh-primenenie/> (accessed: 13.04.2023).

Kazakov A. A. Remote geothermal mapping of the marshes of Western Siberia (on the example of the Tarmansky swamp massif). *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Tyumen State University.* 2013;4:161–167. (In Russ.)

Krutskikh N. V., Mironov V. L., Ryazantsev P. A. The use of GIS technologies to ensure the study of wetlands. *InterCarto. InterGIS.* 2018;24(1):405–418. (In Russ.) doi: 10.24057/2414-9179-2018-1-24-405-418

Labutina I. A., Baldina E. A. Workshop on the course 'Decoding aerospace images': a textbook. Faculty of Geography. Moscow: MGU; 2013. 168 p. (In Russ.)

Medvedeva M. A., Vozbrannaya A. E., Sirin A. A., Maslov A. A. Potential of different multispectral satellite data for monitoring abandoned fire hazardous peatlands and rewetting effectiveness. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space.* 2019;2:150–159. (In Russ.). doi: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-150-159

Nitsenko A. A. A brief course in swamp science. Moscow: Vysshaya shkola; 1967. 147 p. (In Russ.)

Novokhatin V. V., Kazakov A. A. The use of Earth remote sensing data in assessing the process of secondary waterlogging of drained swamps in Western Siberia. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of Tyumen State University.* 2012; 7:167–173. (In Russ.)

Schowengerdt R. A. Remote sensing: models and methods for image processing. 3<sup>rd</sup> ed. Amsterdam: Elsevier; Burlington: Academic Press; 2007. 515 p.

Smagin V. A., Boichuk M. A. Marshes of the north-west Karelian Isthmus (Leningrad Region). *Rastitel'nost' bolot: Sovremennye problemy klassifikatsii, kartografirovaniya, ispol'zovaniya i okhrany: Mat-ly IV Mezhdunar. nauch. seminara = Proceedings of the IV international scientific seminar 'Vegetation of swamps: Modern problems of classification, mapping, use and protection'.* Minsk; 2021. P. 98–101. (In Russ.)

Trass H., Alles P., Pavel Yu., Perk A. Reports of the meeting on the geobotanical study of the marshes of the north-west of the USSR. Tartu; 1963. 352 p. (In Russ.)

Zraenko S. M. The study of wetlands detection algorithms based on remote sensing data. *SVCh-tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii (KRYMIKO 2016)*:

*Mat-ly 26-i Mezhdunarodnoi Krymskoi konferentsii (Sevastopol', 4–10 sentyabrya 2016 goda) = Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2016): Proceedings of the 26<sup>th</sup> international Crimean conf. (Sevastopol, Sept. 4–10, 2016)*. Vol. 11. Sevastopol'; 2016. P. 2419–2424. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 01.11.2025; принята к публикации / accepted: 07.11.2025.  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

**Артемьева Ольга Владимировна**

канд. геогр. наук, доцент кафедры картографии и геоинформатики

*e-mail: o.artemieva@spbu.ru*

**Позднякова Наталия Александровна**

старший преподаватель кафедры картографии и геоинформатики

*e-mail: n.pozdnyakova@spbu.ru*

**Флоринский Игорь Александрович**

студент

*e-mail: st094452@student.spbu.ru*

#### **CONTRIBUTORS:**

**Artemeva, Olga**

Cand. Sci. (Geog.), Associate Professor

**Pozdnyakova, Nataliia**

Senior Lecturer

**Florinskii, Igor**

Student