

3. Электронный ресурс How to Build a Car that Gets 54.5 MPG. – URL: - Режим доступа: <https://www.forbes.com/pictures/ehmk45lii/weight-reduction/>
4. Электронный ресурс Wind turbine blades: Glass vs. carbon fiber. – URL: Режим доступа: <https://www.compositesworld.com/articles/wind-turbine-blades-glass-vs-carbon-fiber/>
5. Промышленный дизайн Российской Федерации: возможность преодоления «дизайн-барьера»: учеб. пособие / под ред. М. С. Липецкой, С. А. Шмелевой – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 80 с.
6. Сысоева, В. В. Алгоритмы оптимизации топологии силовых конструкций / В. В. Сысоева, В. В. Чедрик // Учёные записки ЦАГИ. – 2011. – Т. 42. – № 2. – С. 91–102.
7. Зиновьев, Д. В. Основы проектирования в Autodesk Inventor 2016. Изд. 2-е / под ред. Азанова М. – М. : ДМК Пресс, 2017. – 256 с.
8. Generative Design Market Research Report : сайт. – USA, 2022. – URL: <https://www.marketdataforecast.com/market-reports/generative-design-market/>

УДК 528.88:581.526.33

## МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ПЛОЩАДИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ ПРИБРЕЖНОЙ ПОЛОСЫ РЕКИ ЯСЕЛЬДА

*А. А. Яновский*

ГНУ «Институт природопользования НАН Беларуси», Минск, Беларусь,  
yanouski@ya.ru

### **Аннотация**

По данным дистанционного зондирования выполнено картографирование динамики площади естественных фитоценозов пойменных болот реки Ясельда на территории биологического заказника «Споровский». Показано ежегодное существенное сокращение их площади в прибрежной полосе реки вследствие изменения ее водного режима и трофности.

**Ключевые слова:** спутниковое картографирование, фитоценозы пойменных болот, река Ясельда, Sentinel-2.

## MULTIANNUAL AREA DYNAMICS OF NATIVE PHYTOCENOSIS IN THE YASELDA RIVER RIPARIAN ZONE

*A. A. Yanovskiy*

### **Abstract**

Natural phytocenoses of floodplain marshes of the Yaselda River on the territory of the «Sporovsky» biological reserve were mapped on the basis of remote sensing data. An annual significant reduction in their area in river riparian zone is shown due to changes in the river's water regime and trophicity.

**Keywords:** satellite mapping, floodplain marshes plant communities, Yaselda River, Sentinel-2.

**Введение.** Современные луга Полесья образовались преимущественно в результате нарушения водного режима, а в некоторых случаях также эвтрофикации болотных экосистем, которые для водно-болотных особо охраняемых природных территорий (ООПТ) являются целевыми для сохранения климаксными биогеоценозами. В настоящее время в результате существенного сокращения сенокосения и выпаса скота на участках лугов, особенно мелкоконтурных и нарушения водного режима пойменных болот происходит их зарастание древесно-кустарниковой растительностью и крупнотравьем [3]. Как правило, зарастание лугов считается негативным процессом, которому необходимо противостоять возобновлением сенокосения или промышленной заготовкой фитомассы. Однако для территорий ООПТ необходимо восстановление и/или сохранение естественных фитоценозов пойменных болот, прежде всего осоковых фитоценозов, и одинаково неприемлемо как возобновление сенокосения и выпаса скота, так и зарастание лугов.

В данной работе выполнено картографирование пятилетней динамики сокращения площади естественных фитоценозов пойменных болот реки Ясельда на территории биологического заказника «Споровский» для ширины прибрежной полосы 50 и 100 м, от пересечения поймы Ясельды границей Дрогичинского и Березовского районов Брестской области (рядом с деревней Высокое) до озера Споровское. Выбор указанного начала участка поймы обусловлен проведением в пойме реки Ясельда в 2015-2017 годах вверх по течению от рассматриваемой территории исследования промышленной заготовки фитомассы [2] и ежегодно проводимым заказником Споровский спортивным сенокосением возле деревни Высокое. Выбор ширины исследуемой прибрежной полосы связан с минимальной шириной водоохранной зоны реки Ясельда. Согласно Водному кодексу Республики Беларусь, река Ясельда относится к средним рекам [1, статья 5]. Для средних рек, согласно Водному кодексу, минимальная ширина прибрежной полосы равна 100 метрам [1, статья 52]. В пределах данной полосы запрещена сельскохозяйственная деятельность за исключением заготовки фитомассы.

**Объект и методы исследования.** Заказник Споровский занимает площадь 19384 га и является первой территорией в Республике Беларусь, получившей международный статус охраны Рамсарского угодья. Основу заказника составляет комплекс низинных пойменных болот – Споровские болота, расположенные в пойме реки Ясельды по обе стороны русла и являющиеся одним из крупнейших в Полесье массивом низинных болот, который на многих участках сохранился в малонарушенном виде.

На территории исследования русло реки Ясельда меандрирующее, сильно заросшее водной растительностью, ширина составляет 10-80 м. Местами оно разделяется на отдельные протоки и образует небольшие затопляемые острова. Берега низкие, заболоченные, вдоль русла располагаются преимущественно

заросли тростника. В средней части заказника река протекает через зарастающее мелководное озеро Споровское [5].

Начиная с 1960-х годов проводились масштабные работы в бассейне реки Ясельда: мелиорация более 30 % ее водосбора, спрямление практически на всем протяжении от истока до границы заказника, а также строительство водохранилища и рыбхоза «Селец». Они привели к существенному уменьшению максимальных расходов воды и увеличению летнего меженного стока, а также интенсивному зарастанию русла реки на территории заказника вследствие эвтрофикации. В годы с недостатком воды на заполнение прудов и водохранилища из реки Ясельда забирается ее большее количество, в результате чего в расположенном ниже по течению заказнике уровень воды понижается еще в большей степени. Во влажные годы наоборот водохранилище и рыбхоз сбрасывают дополнительное количество воды, богатой биогенными элементами, что приводит к затоплению поймы на длительный период. В результате, пойма Ясельды на территории заказника зарастает устойчивым (при условии достаточного минерального питания) к колебанию уровня грунтовых вод тростником [12], а на участках с устойчивым снижением уровня грунтовых вод – ивняками. В прибрежной полосе реки происходит утрата естественных осоковых фитоценозов пойменных Споровских болот, для охраны которых и создан биологический заказник «Споровский».

Работа выполнена по снимкам спутников серии Sentinel-2, которая представлена двумя околополярными находящимися на одной орбите спутниками-близнецами (2A и 2B), расположенными на угловом расстоянии 180° друг от друга. Каждый спутник серии Sentinel-2 содержит единственный мультиспектральный прибор – Multispectral Instrument (MSI), который регистрирует излучение в 13 спектральных каналах видимого диапазона и ближнего и коротковолнового ИК-диапазонов спектра.

Отобранные снимки Sentinel-2 уровня обработки 1C являются безоблачными для территории исследования и попадают в интервал 17 дней августа с датами съемки: 08.08.2015, 08.18.2015, 25.08.2016, 12.08.2017, 10.08.2018 и 25.08.2019.

Снимки Sentinel-2 уровня обработки 1C являются орторектифицированными изображениями, представленными значениями коэффициента отражения на уровне апертуры радиометра с субпиксельной точностью совмещения спектральных каналов. Атмосферную коррекцию выполнили с помощью программы обработки Sen2Cor версии 2.9 [14]. В работе использовали каналы с пространственным разрешением 10 и 20 метров, последние привели к разрешению 10 метров согласно [8]. Из дальнейших расчетов исключили пиксели с искаженными или вышедшими на насыщение значениями, а также облака и их тени. Характеристика использованных в работе спектральных каналов приведена в таблице 1.

**Таблица 1** – Спектральные каналы спутников серии Sentinel-2 (S2A и S2B)

Номер канала	S2A		S2B		Номинальное пространственное разрешение, м
	Центральная длина волны, нм	Ширина канала 0.5 max, нм	Центральная длина волны, нм	Ширина канала 0.5 max, нм	
2	492.4	66	492.1	66	10
3	559.8	36	559.0	36	10
4	664.6	31	664.9	31	10
5	704.1	15	703.8	16	20
6	740.5	15	739.1	15	20
7	782.8	20	779.7	20	20
8	832.8	106	832.9	106	10
8a	864.7	21	864.0	22	20
11	1613.7	91	1610.4	94	20
12	2202.4	175	2185.7	185	20

Для коррекции субпиксельного смещения геопривязки снимков выполнили последовательную корегистрацию каждого снимка Sentinel-2 на снимок предыдущего года съемки, т. е. снимок за 2016 корегистрировали на снимок за 2015 год, за 2017 – на снимок за 2016 и т. д. Коррекцию смещения выполняли только в тех случаях, когда это приводило к увеличению сходства снимков в пределах окна их сравнения. Расчеты выполнили в командной строке языка программирования Python с использованием библиотеки *arosics* [13].

Подспутниковые исследования провели 29.07.2015 на участке торфяного месторождения Песчанка – открытом не облесённом пойменном месторождении в естественном состоянии, расположенном в пойме реки Ясельда. Растительность исследуемого участка месторождения представлена осоковыми, осоково-гипновыми и тростниковыми фитоценозами, расположенными на площади 68 га. Картографирование растительности выполнили путем наземного обследования с последующим уточнением и экстраполяцией границ по спутниковым снимкам сверхвысокого пространственного разрешения. Для экстраполяции результатов подспутниковых исследований на всю картографируемую пойму реки Ясельда рассчитали по каждому из снимков Sentinel-2 за 2015 год трансформированный разностный индекс растительности – Transformed difference vegetation index (TDVI) [6], который по ширине охватываемого диапазона проективного покрытия растительности существенно превосходит нормализованный разностный индекс растительности – Normalized difference vegetation index (NDVI) [15] и при этом характеризуется близкой к линейной зависимостью от величины проективного покрытия растительности [7].

По снимкам Sentinel-2 индекс TDVI рассчитывается по формуле (1)

$$TDVI = 1.5 \times (ИК - К) / (\sqrt{ИК^2 + К + 0.5}), \quad (1)$$

где **К**, **ИК** – значения спектральных каналов 4 и 8А мультиспектрального прибора MSI спутников серии Sentinel-2.

Используя TDVI визуально сравнили эффективность разделения тростниковых и осоковых фитоценозов на диаграммах рассеяния, построенных по десяти возможным комбинациям TDVI и каждого канала MSI. Анализ показал, что наиболее эффективное разделение и компактная локализация данных фитоценозов на диаграмме рассеяния обеспечиваются комбинацией TDVI – канал 5 MSI, которую далее использовали при создании обучающей выборки для указанных тематических классов.

Полученную обучающую выборку дополнили участками с открытыми почвами и антропогенными объектами, открытой водной поверхностью, сомкнутой древесной растительностью, полигоны с которыми создали непосредственно по спутниковым снимкам разного пространственного разрешения. Также к тростниковым фитоценозам добавили древесно-кустарниковую форму ивняков. Таким образом, обучающая выборка для каждого из двух снимков Sentinel-2 за 2015 год, выбранных в качестве базовых, представила 5 тематических классов. В свою очередь каждая обучающая выборка содержала пиксели, центры которых попали внутрь полигонов выборки, а каждый пиксель содержал 10 значений используемых в работе спектральных каналов. В таблице 2 приведены характеристики обучающих выборок.

**Таблица 2** – Характеристики обучающих выборок

Базовый снимок	Число пикселей	Число полигонов	Площадь тематического класса, га				
			Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4	Класс 5
08.08.2015	46318	42	19.1	96.2	139.2	76.1	126.6
18.08.2015	44905	33	19.1	96.2	137.7	64.0	132.0

*Примечание: Класс 1 - тростник и древесно-кустарниковая форма ивняков; Класс 2 - осоковые фитоценозы; Класс 3 - сомкнутая древесная растительность; Класс 4 - открытые почвы и антропогенные объекты; Класс 5 - открытая водная поверхность.*

Для тематического картографирования прибрежной полосы реки Ясельда выбрали метод опорных векторов (support vector machines (SVM)), реализованный в библиотеке libSVM [9]. В качестве базисной функции (ядра) выбрали радиальную функцию, поскольку она в большинстве случаев обеспечивает лучшую точность модели и меньшую трудоемкость оптимизации значений ее параметров [11]. Коррекцию несбалансированности численностей классов обучающей выборки выполнили путем умножения на веса, обратно пропорциональные численностям соответствующих классов и последующего приведения суммы весов к их сумме для сбалансированной выборки.

Для определения оптимальных значений параметров  $C$  и  $\gamma$  радиальной базисной функции при оценке точности классификации использовали коэффициент каппа ( $\kappa$ ) [10]. Процедура оптимизации включала поиск по сетке с использованием мультипликативного шага, т.е. последующее значение рассчитывалось путем умножения значения шага на предыдущее значение. На первом этапе определения значений параметров  $C$  и  $\gamma$  использовали относительно большие («грубые») значения мультипликативного шага, которые

далее последовательно уточняли с уменьшением на каждом последующем этапе значения мультипликативного шага и диапазона поиска значений параметров  $C$  и  $\gamma$ .

Оценка точности основывалась на 10-кратной перекрестной проверке на достоверность результатов классификации обучающей выборки. Итоговый показатель качества классификации рассчитывали как среднее арифметическое всех оценок точности классификации.

Для применения результатов обучения SVM по снимку Sentinel-2 за 2015 год к снимкам Sentinel-2 за остальные года выполнили их радиометрическую нормализацию к снимку за 2015 год на основе псевдоинвариантных пикселей. Для оценки воспроизводимости результатов мониторинга нормализацию снимков за 2016-2019 года выполнили отдельно к двум снимкам за 2015 год. Выделение псевдоинвариантных пикселей провели на парах соответствующих каналов пар снимков для территории полигонов обучающей выборки. Псевдоинвариантными считали пиксели, попавшие в буферную зону вдоль прямой с углом наклона в  $45^\circ$ , проходящей через центроид данных пикселей. Оптимальная ширина буферной зоны определялась путем итерационного ее изменения с расчетом значения коэффициента линейной корреляции для попавших в буферную зону пикселей. Определялась такая ширина зоны, для которой значение коэффициента линейной корреляции и число псевдоинвариантных пикселей, находящиеся в обратной зависимости, превышают заданные пороговые значения, равные, соответственно, 0.95 и 1000.

Для получения общего для всех снимков расположения границ прибрежной полосы, а, следовательно, и одинаковой площади полосы создали единую для всех анализируемых снимков маску исследуемого участка реки Ясельда при максимальной ширине ее русла. Полученное русло включило объединенные в единую маску полигоны класса «открытая водная поверхность» результатов классификации снимков, буферизованную центральную линию реки Ясельда и все острова.

Поскольку для всех снимков, нормализованных на один базовый снимок, используется одинаковая обучающая выборка, расчет общей точности классификации и значения коэффициента каппа [10] для разных снимков соответствуют только различному случайному разделению обучающей выборки на обучающую и проверочные части. В данном случае они оказались равными не только для снимков, нормализованных на один базовый снимок, но и для обоих базовых снимков: общая точность классификации составила 99,9978 %, а значение коэффициента каппа оказалось равным 0,99997. Поскольку в обучающую выборку по всем тематическим классам отбирались преимущественно типичные их представители, полученные оценки точности классификации относятся преимущественно к разделению данных типичных представителей тематических классов. Репрезентативность обучающей выборки оценили путем расчета доли пикселей территории исследования, значения которых находятся в пределах диапазонов значений (одновременно по

всем 10 спектральным каналам) пикселей обучающей выборки, отдельно для зоны 50 м и 100 м.

Значения среднеквадратичной погрешности картографирования (СКП) в отдельные года приняли равными обратным значениям репрезентативности снимков, а значения весов отдельных снимков каждой пары приняли равными квадратам полученных значений репрезентативности снимков. Полученные значения использовали для оценки значений весов и СКП тематического картографирования для пар снимков каждого года. Обратный вес функции независимых аргументов равен сумме произведений квадратов частных производных по каждому аргументу на обратные веса соответствующих аргументов [4, стр. 83]. Поэтому значения веса для пар снимков каждого года рассчитали как среднее гармоническое,  $\frac{p_1 \times p_2}{p_1 + p_2}$ , где  $p_1$  и  $p_2$  – значения весов обоих снимков пары. В то же время значения СКП картографирования для пар снимков каждого года рассчитали как  $\sqrt{m_1^2 + m_2^2}$ , где  $m_1$  и  $m_2$  – значения среднеквадратичной погрешности обоих снимков пары. Результаты расчетов приведены в таблице 3.

**Таблица 3** – Значения весов и среднеквадратичной погрешности для каждого года картографирования

Ширина зоны, м		2015 год	2016 год	2017 год	2018 год	2019 год
50	Вес	0.128	0.056	0.072	0.091	0.174
	СКП	2.798	4.208	3.731	3.311	2.397
100	Вес	0.129	0.075	0.096	0.1	0.173
	СКП	2.782	3.663	3.23	3.169	2.402

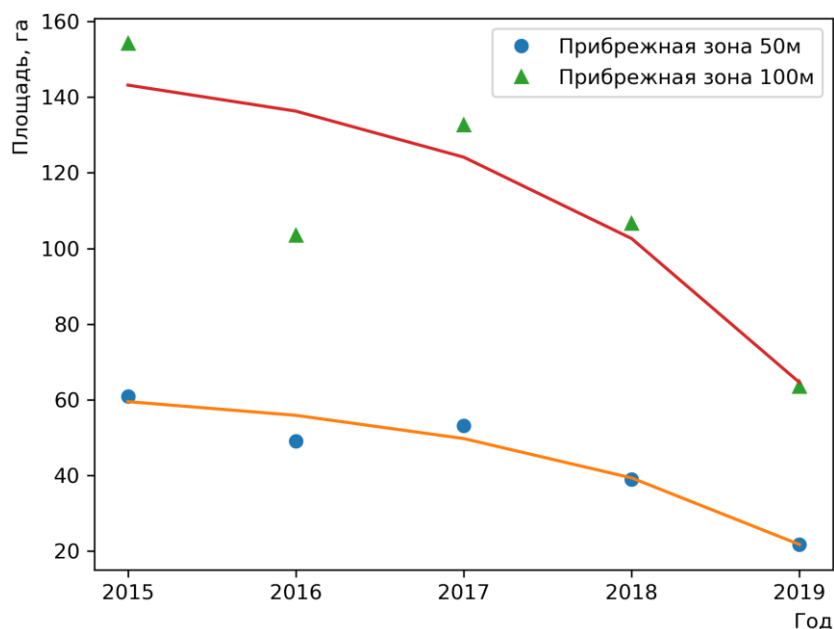
Поскольку территория исследования характеризуется высокой мозаичностью поверхностного покрова, для уменьшения влияния на результаты картографирования различного расположения сетки пикселей разных снимков выполнили генерализацию результатов картографирования. Для определения наиболее подходящих значений связности пикселей при картографировании (4 или 8) и степени генерализации результатов картографирования (минимальное число пикселей отдельного полигона) выполнили тематическое картографирование при всех комбинациях значений связности и генерализации от 2 до 4 (каждый полигон с меньшим числом пикселей присоединялся к соседнему полигону с наибольшей длиной общей границы). Для обоих значений ширины прибрежной полосы реки Ясельда общая СКП картографирования тематических классов оказалась минимальной для комбинации 8-связность и 2-генерализация, поэтому для дальнейшего анализа использовали тематические карты, рассчитанные с данной комбинацией.

Объединение классов тематического картографирования прибрежной полосы реки Ясельда выполнили при условии минимизации наибольшего значения СКП итоговых классов. Поскольку второй класс характеризуется наибольшим среди всех классов значением СКП картографирования и при этом

СКП картографирования третьего и четвертого классов существенно меньше, чем у второго, минимизация наибольшего значения СКП итоговых классов будет достигнута при объединении первого, третьего и четвертого классов.

В результате, в первый класс объединили тростник и древесно-кустарниковую форму ивняков, сомкнутую древесную растительность и открытые почвы с антропогенными объектами. Естественные фитоценозы пойменных болот (преимущественно осоковые фитоценозы) представили второй класс.

**Результаты и обсуждение.** Результаты картографирования динамики площади естественных фитоценозов пойменных болот исследуемой территории, аппроксимированные экспоненциальной кривой  $y = a \times e^{b \times x} + c$ , приведены на рисунке 1. Аппроксимацию выполнили нелинейным методом наименьших квадратов с использованием в качестве значений неопределенности соответствующих значений СКП (таблица 3).



**Рисунок 1** – Результаты картографирования и их аппроксимация

Полученные после аппроксимации значения площади естественных фитоценозов пойменных болот прибрежной зоны реки Ясельда представлены в таблице 4.

**Таблица 4** – Динамика площади естественных фитоценозов пойменных болот прибрежной зоны реки Ясельда

Ширина зоны, м		2015 год	2016 год	2017 год	2018 год	2019 год
50	Площадь, га	59.52	55.9	49.77	39.38	21.78
	Доля, %	26.3	24.7	21.99	17.4	9.62
100	Площадь, га	143.15	136.28	124.12	102.62	64.58
	Доля, %	25.08	23.88	21.75	17.98	11.32



Из таблицы 4 следует, что за 5 лет наблюдений произошло существенное сокращение площади естественных фитоценозов пойменных болот прибрежной полосы реки Ясельда шириной и 50, и 100 метров. Единственным исключением является 2016 год, который характеризуется наибольшим из всех годов значением СКП и наименьшим значением веса (таблица 3), т.е. наименьшей репрезентативностью обучающей выборки. Основной причиной низкой репрезентативности обучающей выборки за 2016 год является высокая водность реки Ясельда, составившая за июнь-сентябрь 2016 года 123% (базовый снимок – 26%) от средних многолетних значений стока реки Ясельда до гидропоста Сенин.

**Заключение.** Нарушение водного режима и эвтрофикация рек Полесья приводит к зарастанию пойменных болот тростником и древесно-кустарниковой растительностью с утратой естественных фитоценозов, прежде всего осоковых. Для прибрежной полосы реки Ясельда на территории биологического заказника «Споровский» показано ежегодное существенное сокращение площади естественных фитоценозов пойменных болот, наиболее выраженное в прибрежной полосе шириной 50 м. Для сохранения естественных фитоценозов пойменных болот биологического заказника «Споровский» необходимо стабилизировать водный режим и трофность реки Ясельда, которые в настоящее время зависят от использования воды расположенными выше по течению от заказника водохранилищем «Селец» и рыбхозом.

#### Список цитированных источников

1. Водный кодекс Республики Беларусь. 30 апреля 2014 г. № 149-З: принят Палатой представителей 2 апреля 2014 г.: одобр. Советом Респ. 11 апреля 2014 г. (Электронный ресурс) // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. Режим доступа: <https://etalonline.by/document/?regnum=hk1400149> Дата доступа: 21.10.2021.
2. Груммо, Д. Г. Структура и динамика растительности пойменного болота под влиянием кошения / Д. Г. Груммо, Н. А. Зеленкевич, Е. В. Мойсейчик, О. В. Созинов, Р. В. Цвирко, Д. Ю Жилинский // Современные концепции и практические методы сохранения фиторазнообразия : материалы Междунар. науч.-практ. семинара. 1-4 октября 2019. Минск-Гродно, Беларусь, 2019. – С. 145–150.
3. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: результаты наблюдений, 2020 год / Под общ. ред. Е. П. Богодяж. Мн., Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды, 2021. – 591 с.
4. Поклад Г. Г., Гриднев С. П., Попов Б. А. Инженерная геодезия : учебное пособие для вузов. Москва, Берлин : ДиректМедиа, 2020. 497 с.
5. Природа Беларуси. Энциклопедия. В 3 т. / Редкол.: В. Ю. Александров [и др.]; Гл. ред. Т. В. Белова. Мн. : Белорусская энциклопедия, 2010. – Т. 2. Климат и вода. – 504 с.
6. Bannari A., Asalhi H., Teillet P. M. Transformed difference vegetation index (TDVI) for vegetation cover mapping // IEEE International geoscience and

- remote sensing symposium. IEEE, 2002. Vol. 5. P. 3053–3055. DOI: 10.1109/IGARSS.2002.1026867
7. Bannari A., Ozbaldr A., Langlois A. Spatial distribution mapping of vegetation cover in urban environment using TDVI for quality of life monitoring // 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, Spain, 23-28 July 2007. IEEE, 2007. P. 679–682. DOI: 10.1109/IGARSS.2007.4422887
  8. Brodu, N. Super-Resolving Multiresolution Images With Band-Independent Geometry of Multispectral Pixels // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2017. Vol. 55. No. 8. P.4610-4617. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2694881
  9. Chang C. C., Lin C. J. LIBSVM : a library for support vector machines // ACM Trans. Intell. Syst. Technol. 2011. Vol. 2, iss. 3, art. 27. P. 1–27. DOI: 10.1145/1961189.1961199
  10. Cohen, J. A coefficient of agreement for nominal scales // Educ. Psychol. Meas. 1960. Vol. 20, No. 1. P. 37–46. DOI: 10.1177/001316446002000104
  11. Hsu C. W., Chang C. C., Lin C. J. A practical guide to support vector classification. 2003. Last updated: May 19, 2016. 16 p.
  12. Haslam S. M. The performance of *Phragmites communis* Trin. in relation to water-supply // Ann. Bot. 1970. Vol. 34, iss. 4. P. 867-877. DOI: 10.1093/oxfordjournals.aob.a084418
  13. Scheffler D., Hollstein A., Diedrich H., Segl K., Hostert P. AROSICS: An automated and robust open-source image co-registration software for multi-sensor satellite data // Remote Sens. 2017. Vol. 9. №. 7. P. 676-701. DOI: 10.3390/rs9070676
  14. Sen2Cor 2.9 [Electronic resource]. 2021. Mode of access: <http://step.esa.int/main/third-party-plugins-2/sen2cor/>. Date of access: 21.10.2021.
  15. Tucker, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sens. Environ. 1979. Vol. 8, iss. 2. P. 127–150. DOI: 10.1016/0034-4257(79)90013-0