

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ
КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

**СПУТНИКОВОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЛОЩАДИ
ЕСТЕСТВЕННЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ ПРИБРЕЖНОЙ ПОЛОСЫ
РЕКИ ЯСЕЛЬДА**

© 2022 г. А. А. Яновский*

ГНУ “Институт природопользования НАН Беларуси”, Минск, Республика Беларусь

*E-mail: yanouski@ya.ru

Поступила в редакцию 23.05.2022 г.

Описаны методические основы и результаты картографирования динамики площади естественных фитоценозов пойменных болот реки Ясельда на территории биологического заказника “Споровский”. Показано ежегодное существенное сокращение их площади вследствие изменения водного режима и трофности реки. Установлено, что точность радиометрической нормализации путем коррекции смещения значений пикселей относительно ноля для атмосферно скорректированных снимков Sentinel-2 пойменного торфяника можно оценить по разности между базовым и нормализуемым снимками значений стока реки за месяцы вегетации.

Ключевые слова: спутниковое картографирование, фитоценозы пойменных болот, радиометрическая нормализация спутниковых снимков, Sentinel-2

DOI: 10.31857/S0205961422050098

ВВЕДЕНИЕ

На всей территории Беларуси 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 (НСМОС, 2021). С точки зрения сельского хозяйства данный процесс является негативным, поскольку, несмотря на существенный рост продуктивности сообществ, в большинстве случаев их кормовая ценность снижается, поскольку даже при отсутствии древесно-кустарниковой растительности росту низовых бобовых и злаковых трав препятствует постепенно увеличивающийся слой травяного опада. В результате резко снижается обилие ценных кормовых видов, вплоть до их полного исчезновения. Однако с точки зрения экологии зарастание лугов является естественной сукцессией, приводящей к появлению более устойчивых экосистем. Для участков особо охраняемых природных территорий (ООПТ), на которых запрещен выпас скота и сенокосение, данная сукцессия на первый взгляд является положительным явлением, а ее необратимость стабилизирует дальнейшее существование ООПТ. Вместе с тем, луга Полесья образовались в результате нарушения водного режима, а в некоторых случаях также эвтрофикации болотных экосистем, которые для водно-болотных ООПТ и явля-

ются целевыми для сохранения климаксными биогеоценозами. Таким образом, 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 гг. вверх по течению от рассматриваемой территории исследования промышленной заготовки фитомассы (Груммо и др., 2019) и ежегодно проводимым Споровским заказником 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 (Водный кодекс, 2014, статья 5). Для средних рек, согласно Водному кодексу, минимальная ширина прибрежной полосы равна 100 м (Водный кодекс,

2014, статья 52). В пределах данной полосы запрещена сельскохозяйственная деятельность за исключением заготовки фитомассы.

ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Споровский заказник 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 Ясельда по обе стороны русла. Споровские болота являются одним из крупнейших в Полесье массивом низинных болот, которые на многих участках сохранились в малонарушенном виде.

Река Ясельда берет начало из болота Дикое (Пружанский район Брестской области Беларуси) и впадает в реку Припять. Общая длина реки после ее спрямлений на отдельных участках составляет около 226 км, площадь водосбора — 7790 км². В пойме реки создано водохранилище Селец. В пределах заказника долина реки неясно выраженная с преобладающей шириной 6–8 км. Склоны пологие, правый умеренно крутой с наличием террас. Высота склонов 2–8 м. Пойма двухсторонняя, реже чередующаяся по берегам, преобладающая ширина 0.8–1.2 км, наименьшая 100 м. На территории исследования русло реки Ясельда меандрирующее, сильно заросшее водной растительностью, ширина составляет 10–80 м. Места 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 (площадь 11.5 км², средняя глубина 1.4 м) (Природа Беларуси, 2010).

До 1960-х годов водный режим реки Ясельда характеризовался длительным и высоким весенним половодьем, летней меженью и редкими дождевыми паводками в течение лета. Последующая мелиорация более 30% водосбора реки Ясельда, спрямление ее практически на всем протяжении от истока до границы заказника, строительство водохранилища и рыбхоза “Селец” привели к существенному уменьшению максимальных расходов воды, увеличению летнего меженного стока и длительным наводнениям за счет сброса воды из прудов рыбхоза в период облова в июле-августе, 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 уро-

вень 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 (Haslam, 1970)) к колебанию уровня грунтовых вод тростником, 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 Споровский биологический заказник.

ПОДБОР СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ, ИХ РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ И КОРЕГИСТРАЦИЯ

Работа выполнена по снимкам спутников серии Sentinel-2.

Серия спутников Sentinel-2 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 — Multi-spectral Instrument (MSI), который регистрирует излучение в 13 спектральных каналах видимого диапазона и ближнего и коротковолнового ИК-диапазонов спектра (табл. 1).

Снимки Sentinel-2 уровня обработки 1C (идентификатор тайла — T35ULU), безоблачные для территории исследования с датами съемки в диапазоне 01.08–25.08 2015–2019 гг., подобрали с помощью web-интерфейса Copernicus Open Access Hub (Copernicus Open Access Hub, 2021). Итоговые отобранные снимки 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 (Sen2Cor, 2021). Атмосферная коррекция процессора Sen2Cor основана на алгоритме “Атмосферная/топографическая коррекция спутниковых снимков” (ATCOR) (Richter, Schläpfer, 2016) и использует модель переноса излучения LIBRADTRAN (Mayer, Kylling, 2005). Все параметры атмосферных газов и аэрозолей либо определяются непосредственно алгоритмом, ли-

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

Номер канала	S2A		S2B		Пространственное разрешение, м
	центральная длина волны, нм	ширина канала 0.5 max, нм	центральная длина волны, нм	ширина канала 0.5 max, нм	
1	442.7	21	442.2	21	60
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
9	945.1	20	943.2	21	60
10	1373.5	31	1376.9	30	60
11	1613.7	91	1610.4	94	20
12	2202.4	175	2185.7	185	20

Таблица 2. Результаты последовательной корегистрации снимков Sentinel-2 на снимок с датой съемки 08.08.2015

Дата съемки	Смещение по долготе, м	Смещение по широте, м	Общее смещение, м	Оценка надежности значений смещения, %
25.08.2016	-3.09	-3.57	4.72	96.8
10.08.2018	2.62	1.37	2.96	96.2

бо фиксируются при некотором значении до запуска модели.

В работе использовали каналы с пространственным разрешением 10 и 20 м, последние привели к разрешению 10 м согласно (Brodu, 2017). Из дальнейших расчетов исключили пиксели с искаженными или вышедшими на насыщение значениями, а также облака и их тени.

Согласно текущей оценке качества продукта Sentinel-2 Level-1C (Jackson, 2022), круговая ошибка геопривязки без использования наземных контрольных точек полученных до августа 2021 снимков S2A составляет 1.2 пикселя, S2B – 1.5 пикселя при уровне доверительной вероятности 95%. Для коррекции субпиксельного смещения геопривязки снимков выполнили последовательную корегистрацию каждого снимка Sentinel-2 на снимок предыдущего года съемки, т.е. снимок за 2016 г. корегистрировали на снимок за 2015 г., за 2017 г. – на снимок за 2016 г. и т.д. Коррекцию смещения выполняли только в тех случаях, когда это приводило к увеличению сходства снимков в пределах окна их сравнения. Расчеты выполняли в командной строке языка программирования Python с использованием библиотеки arosics (Scheffler et al., 2017). Результаты расчетов приведены в табл. 2 и 3.

мог за 2016 г. корегистрировали на снимок за 2015 г., за 2017 г. – на снимок за 2016 г. и т.д. Коррекцию смещения выполняли только в тех случаях, когда это приводило к увеличению сходства снимков в пределах окна их сравнения. Расчеты выполняли в командной строке языка программирования Python с использованием библиотеки arosics (Scheffler et al., 2017). Результаты расчетов приведены в табл. 2 и 3.

ПОДСПУТНИКОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И СОЗДАНИЕ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ

Подспутниковые исследования провели 29.07.2015 на участке торфяного месторождения Песчанка – открытом не облесенном низинном месторождении в естественном состоянии, расположенном в пойме реки Ясельда. Раститель-

Таблица 3. Результаты последовательной корегистрации снимков Sentinel-2 на снимок с датой съемки 18.08.2015

Дата съемки	Смещение по долготе, м	Смещение по широте, м	Общее смещение, м	Оценка надежности значений смещения, %
25.08.2016	-3.31	-2.44	4.11	96.5
10.08.2018	2.62	1.37	2.96	96.2

ность исследуемого участка месторождения представлена осоковыми, осоково-гипновыми и тростниковыми фитоценозами. Площадь участка составила 68 га.

Картографирование растительности территории исследования выполнили путем наземного обследования с последующим уточнением и экстраполяцией границ по спутниковым снимкам сверхвысокого пространственного разрешения. Для этого с GPS-навигатором прошли по границе тростниковых фитоценозов со стороны болота с записью треков, которые далее загрузили в Google Earth. Сопоставление в Google Earth расположения GPS-треков и границы расположенной на берегу реки Ясельда однородной по спектральным характеристикам растительности показало соответствие их локализации. Границу тростниковых фитоценозов со стороны реки Ясельда обвели непосредственно в программе Google Earth. Также прошли по границе оставшейся части участка подспутниковых исследований с осоковыми и осоково-гипновыми фитоценозами, при этом треки GPS-навигатором не записывали, поскольку данные фитоценозы с внешних сторон участка ограничены каналом, лесной растительностью и дорогой, границы которых хорошо видны на спутниковых снимках. Для исключения смешанных пикселей в переходной зоне между тростниковыми и прочими травянистыми фитоценозами при применении обучающей выборки к снимкам Sentinel-2 (поскольку снимки Sentinel-2 характеризуются существенно меньшим пространственным разрешением по сравнению со снимками Google Earth территории исследования), по обе стороны полученной по GPS-трекам границы тростниковых фитоценозов создали буферную зону.

Для экстраполяции результатов подспутниковых исследований на всю картографируемую пойму реки Ясельда рассчитали по каждому из снимков Sentinel-2 за 2015 г. трансформированный разностный индекс растительности – Transformed difference vegetation index (TDVI) (Bannari et al., 2002). TDVI разработан для преодоления недостатков нормализованного разностного индекса растительности – Normalized difference vegetation index (NDVI) (Tucker, 1979) как при частичном покрытии пикселя растительностью, когда его значение в значительной степени зависит от спектральных свойств почвы, так и при густом растительном пологе, когда NDVI выходит на насыщение (Bannari et al., 2002, Bannari et al., 2007). По ширине охватываемого диапазона проективного покрытия растительности TDVI существенно превосходит NDVI, при этом он характеризуется близкой к линейной зависимостью от величины проективного покрытия растительности (Bannari et al., 2007).

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

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

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

Расчет индексов выполнили с помощью программы QGIS (QGIS, 2021).

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 г., выбранных в качестве базовых, представила 5 тематических классов. Различия между обучающими выборками базовых снимков сосредоточились в классах “открытые почвы и антропогенные объекты” и “открытая водная поверхность”. 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 табл. 4 приведены характеристики обучающих выборок.

ТЕМАТИЧЕСКОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ

Для тематического картографирования прибрежной полосы реки Ясельда выбрали метод опорных векторов (support vector machines (SVM)), поскольку он более устойчив, чем большинство других методов классификации с обучением к уменьшению объема обучающей выборки, а также всегда находит не локальный, а именно глобальный минимум. Использована реализация SVM в библиотеке libSVM (Chang, Lin, 2011).

В качестве базисной функции (ядра) выбрали радиальную функцию, поскольку она в большинстве случаев обеспечивает лучшую точность модели и меньшую трудоемкость оптимизации значений ее параметров (Hsu et al., 2003). Приведе-

Таблица 4. 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	46 318	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.

ние исходных данных к одинаковым диапазонам значений не требовалось, поскольку значения коэффициента отражения уже находятся в диапазоне (0, 1). Определение спектральных каналов Sentinel-2, наиболее информативных в отношении тематического картографирования поверхности месторождения, не требовалось по причине относительно небольшого количества каналов и достаточно большого объема обучающей выборки.

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 γ радиальной базисной функции при оценке точности классификации использовали коэффициент каппа (κ) (Cohen, 1960). 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 γ использовали относительно большие (“грубые”) значения мультипликативного шага, равного для обоих параметров 10, для получения ориентировочных значений искомых параметров в диапазонах, соответственно, (0.01, 100) и (0.1, 1000). Далее использовали последовательное уточнение значений параметров C и γ , при этом на каждом последующем этапе уменьшали значение мультипликативного шага, а диапазон поиска значений параметров C и γ ограничивали окрестностями их значений, полученных на предыдущем этапе.

Оценка точности основывалась на перекрестной проверке на достоверность результатов классификации обучающей выборки. Использована 10-кратная перекрестная проверка, т.е. обучающая выборка разделялась на 10 равных частей, и модель обучалась на каждом из 10 сочетаний из 9 частей, используя оставшуюся часть выборки для оценки точности классификации. Итоговый показатель качества классификации рассчитыва-

ли как среднее арифметическое всех оценок точности классификации.

РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ НОРМАЛИЗАЦИЯ НА БАЗОВЫЕ СНИМКИ

Для применения результатов обучения SVM по снимку Sentinel-2 за 2015 г. к снимкам Sentinel-2 за остальные года выполнили их радиометрическую нормализацию к снимку за 2015 г. на основе псевдоинвариантных пикселей. Для оценки воспроизводимости результатов мониторинга нормализацию снимков за 2016–2019 гг. выполнили отдельно (независимо) к двум базовым снимкам за 2015 год. Для определения способа нормализации для каждой пары соответствующих каналов всех пар базового и нормализуемого снимков построили диаграммы рассеяния (рис. 1, а). Анализируя диаграммы рассеяния, можно заключить, что атмосферная коррекция с помощью программы обработки Sen2Cor 2.9 существенно устраняет различия масштабирования диапазонов их значений, поэтому для радиометрической нормализации атмосферно скорректированных снимков Sentinel-2 необходимо в основном скорректировать общее смещение значений пикселей относительно нуля. На рис. 1 нормализация показана на примере одного канала.

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° , 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. Пороговые значения коэффициента линейной корреляции и числа псевдоинвариантных пикселей приняты равными, соответственно, 0.95 и 1000. Результаты

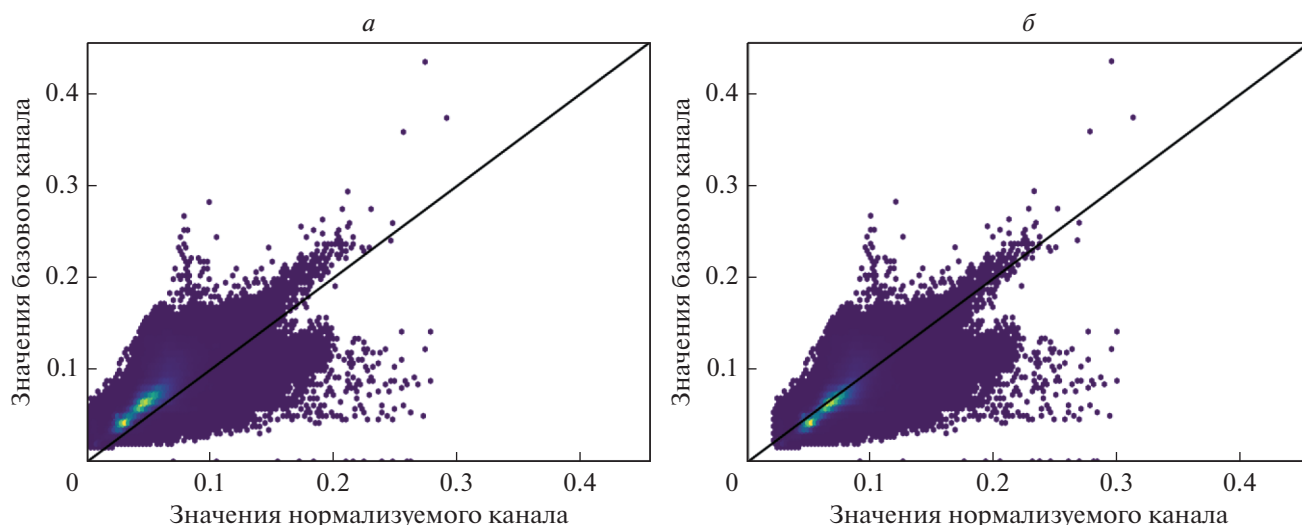


Рис. 1. Нормализация канала 2 снимка с датой съемки 25.08.2016 на снимок с датой съемки 08.08.2015 путем коррекции общего смещения значений пикселей: *а* – до нормализации, *б* – после нормализации.

расчетов для территории полигонов обучающей выборки количества псевдоинвариантных пикселей и их доли от общего числа пикселей территории исследования приведены в табл. 5.

Дальнейшая нормализация путем коррекции различия масштабирования диапазонов значений пар снимков потребует получения обучающей выборки, репрезентативной по диапазону значений в пределах каждого спектрального канала обоих снимков пары.

СОЗДАНИЕ ЕДИНОЙ ДЛЯ ВСЕХ СНИМКОВ МАСКИ ТЕРРИТОРИИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Межгодовое изменение ширины реки Ясельда на территории исследования в зависимости от величины стока, колебания расположения ее границы на снимках Sentinel-2 из-за смешанных пикселей на границе классов, а также постепенное зарастание русла реки приводят к разному расположению границ исследуемой прибрежной полосы на разных снимках. 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.

Центральную линию реки Ясельда и границу озера Споровское взяли из базы данных OpenStreetMap (OpenStreetMap contributors, 2021). Извлечение участка реки Ясельда, коррекцию расположения срединной линии реки в пределах границы реки на спутниковых снимках отдельно для каждого снимка Sentinel-2 и расчеты буфера выполнили с помощью программы QGIS (QGIS, 2021).

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕМАТИЧЕСКОГО КАРТОГРАФИРОВАНИЯ

Поскольку для всех снимков, нормализованных на один базовый снимок, используется одинаковая обучающая выборка, расчет общей точ-

Таблица 5. Результаты расчетов псевдоинвариантных пикселей для полигонов обучающей выборки

Базовый снимок	Нормализуемый снимок				
		25.08.2016	12.08.2017	10.08.2018	25.08.2019
08.08.2015	Число ПИП	1705	30895	19741	26209
	Доля ПИП, %	3.68	66.7	42.62	56.58
18.08.2015	Число ПИП	30523	28355	12935	29683
	Доля ПИП, %	67.97	63.14	28.81	66.1

Примечание: ПИП - псевдоинвариантные пиксели.

Таблица 6. Оценка репрезентативности обучающей выборки для ширины прибрежной зоны реки Ясельда 50 м

Снимок	Базовый снимок 08.08.2015		Базовый снимок 18.08.2015	
	число пикселей	охват значений, %	число пикселей	охват значений, %
08.08.2015	18826	52.04	–	–
18.08.2015	–	–	17783	49.16
25.08.2016	11324	31.31	13209	36.52
12.08.2017	15205	42.03	12585	34.79
10.08.2018	14885	41.15	16087	44.47
25.08.2019	20126	55.64	22801	63.03

Таблица 7. Оценка репрезентативности обучающей выборки для ширины прибрежной зоны реки Ясельда 100 м

Снимок	Базовый снимок 08.08.2015		Базовый снимок 18.08.2015	
	число пикселей	охват значений, %	число пикселей	охват значений, %
08.08.2015	28937	50.87	–	–
18.08.2015	–	–	28893	50.79
25.08.2016	20059	35.26	24547	43.15
12.08.2017	27013	47.48	23233	40.84
10.08.2018	24831	43.65	25989	45.68
25.08.2019	31219	54.88	36352	63.9

ности классификации и значения коэффициента каппа (Cohen, 1960) 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. Несмещенная оценка точности классификации всей территории исследования требует наземного определения тематического класса в большом числе точек измерений, случайно расположенных по всей территории исследования. По данной причине ограничились оценкой репрезентативности обучающей выборки путем расчета доли пикселей территории исследования, значения которых находятся в пределах диапазонов значений (одновременно по всем 10 спектральным каналам) пикселей обучающей выборки. Поскольку в работе используются 2 ширины прибрежной зоны реки Ясельда, 50 и 100 м, оценка репрезентативности выполнена отдельно для каждой зоны. Общее число классифицируемых пикселей для ширины прибрежной зоны 50 и

100 м составило, соответственно, 36173 и 56888. Результаты расчетов приведены в табл. 6 и 7.

Значения средней квадратичной погрешности (СКП) картографирования в отдельные года приняли равными обратным значениям репрезентативности снимков (табл. 6 и 7). В то же время, поскольку отношение весов пар измерений обратно пропорционально отношению квадратов их СКП (Поклад и др., 2019, стр. 80), значения весов отдельных снимков каждой пары приняли равными квадратам полученных значений репрезентативности снимков.

Значения репрезентативности для каждого компонента пары (табл. 6 и 7) использовали также для оценки значений весов и СКП тематического картографирования для непосредственно пар снимков каждого года. Обратный вес функции независимых аргументов равен сумме произведений квадратов частных производных по каждому аргументу на обратные веса соответствующих аргументов (Поклад и др., 2019, 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 СКП обоих снимков пары. Результаты расчетов приведены в табл. 8.

Таблица 8. 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). Разность в разные года картографированной площади тематического класса при нормализации снимка на разные базовые снимки будет зависеть как от абсолютного значения площади класса, так и от значения веса на данный год. Поэтому в расчете на единицу площади данные разности будут зависеть только от значений веса. Другими словами, исключив влияние площади можно считать, что мы измеряем в разные года одну и ту же величину, и применить к результатам измерений известные формулы (напр., Поклад и др., 2019) для расчета средней квадратичной погрешности взвешенного среднего арифметического значения двойных (парных) измерений, с коррекцией систематического смещения отдельных тематических классов) при неравноточных измерениях разных пар (неравноточного картографирования в разные года) (формула (2)). На основе полученных значений СКП рассчитали значение общей для каждой комбинации СКП, $\sqrt{\sum_i M_i^2}$, где M_i – СКП картографирования отдельных классов. Результаты расчетов представлены в табл. 9.

$$\text{СКП}_i = \sqrt{\frac{\sum_k \frac{p_k' \times p_k''}{p_k' + p_k''} (d_{ik} - \delta_i)^2}{2 \times (n-1) \times \sum_k \frac{p_k' \times p_k''}{p_k' + p_k''}}}, \quad (2)$$

где СКП_i – средняя квадратичная погрешность картографирования класса i ,

$\delta_i = \sum_k \frac{p_k' \times p_k''}{p_k' + p_k''} d_{ik} / \sum_k \frac{p_k' \times p_k''}{p_k' + p_k''}$ – значения систематического смещения результатов картографирования класса i ,

$d_{ik} = \left(s_{ik}' - s_{ik}'' \right) \left(p_k' + p_k'' \right) / \left(p_k' s_{ik}' + p_k'' s_{ik}'' \right)$ – приведенные к единице площади разности картографированных площадей классов при нормализации снимка на разные базовые снимки,

s_{ik}' и s_{ik}'' – значения площадей классов при нормализации снимка на разные базовые снимки,

p_k' и p_k'' – значения весов обоих снимков k -ой пары,

i – номер тематического класса, k – номер пары снимков (каждая из пар соответствует году), n – число пар снимков (число лет).

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 (табл. 9), 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. СКП картографирования (в расчете на 1 га) полученных итоговых классов

Таблица 9. Значения среднеквадратичной погрешности картографирования прибрежной зоны реки Ясельда при различных комбинациях значений связности и генерализации

Ширина зоны, м	Связность	Степень генерализации	Класс 1, СКП	Класс 2, СКП	Класс 3, СКП	Класс 4, СКП	Общая СКП на единицу площади
50	4	2	0.02837	0.13404	0.07168	0.04733	0.16171
		3	0.02821	0.13488	0.06996	0.05065	0.16263
		4	0.02809	0.13644	0.06827	0.05132	0.1634
	8	2	0.02832	0.13367	0.07085	0.04534	0.16045
		3	0.02828	0.13512	0.07009	0.04709	0.16182
		4	0.02833	0.13641	0.06882	0.04924	0.163
100	4	2	0.03455	0.10944	0.06348	0.0513	0.14083
		3	0.0346	0.10972	0.06319	0.0542	0.142
		4	0.03439	0.11071	0.06413	0.05527	0.14355
	8	2	0.03435	0.10925	0.06362	0.04889	0.13984
		3	0.03447	0.11002	0.06347	0.05055	0.14098
		4	0.0344	0.11088	0.06351	0.05185	0.14213

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;

СКП – средняя квадратичная погрешность.

Таблица 10. Динамика площади естественных фитоценозов пойменных болот прибрежной зоны реки Ясельда по результатам картографирования

Ширина зоны, м		2015 год	2016 год	2017 год	2018 год	2019 год
50	Площадь, га	60.96	49.1	53.2	38.94	21.75
	Доля, %	27.22	21.92	23.76	17.39	9.71
100	Площадь, га	154.17	103.47	132.63	106.58	63.5
	Доля, %	27.51	18.46	23.67	19.02	11.33

для ширины прибрежной зоны 50 м составила 0.08876 га для первого класса и 0.13367 га – для второго; для ширины прибрежной зоны 100 м – 0.08728 га для первого класса и 0.10925 га – для второго. Результаты картографирования динамики площади естественных фитоценозов пойменных болот исследуемой территории приведены в табл. 10.

Поскольку происходит монотонное сокращение площади естественных фитоценозов пойменных болот прибрежной зоны реки Ясельда, полученные значения их площади аппроксимировали экспоненциальной кривой $y = ae^{bx} + c$ (рис. 2). Аппроксимацию выполнили нелинейным методом наименьших квадратов с использованием в качестве значений неопределенности соответствующих значений СКП (табл. 8), которые рассматривали как относительные. Итоговые значения площади и их доли представлены в табл. 11.

Результаты картографирования свидетельствуют о существенном сокращении за 5 лет наблюдений площади естественных фитоценозов пойменных болот прибрежной полосы реки

Ясельда шириной и 50, и 100 м. Единственным исключением является 2016 г., который характеризуется наибольшим из всех годов значением СКП и наименьшим значением веса (табл. 8), т.е. наименьшей репрезентативностью обучающей выборки. Это, в свою очередь, косвенно подтверждает корректность принятой оценки репрезентативности обучающей выборки по годам картографирования. Основной причиной низкой репрезентативности обучающей выборки за 2016 г. является высокая водность реки Ясельда, составившая за июнь-сентябрь 2016 г. 123% (базовый снимок – 26%) от средних многолетних значений стока реки Ясельда до гидропоста Сенин (табл. 12) (Государственный водный кадастр, 2016–2020). Значение коэффициента ранговой корреляции Спирмена между водностью и СКП оказалось одинаковым для ширины прибрежной полосы 50 и 100 м и составило 0.9 при уровне значимости $p = 0.037$. Таким образом, точность радиометрической нормализации атмосферно скорректированных снимков Sentinel-2 пойменного торфяника путем коррекции смещения значений пикселей относительно ноля можно оценить по

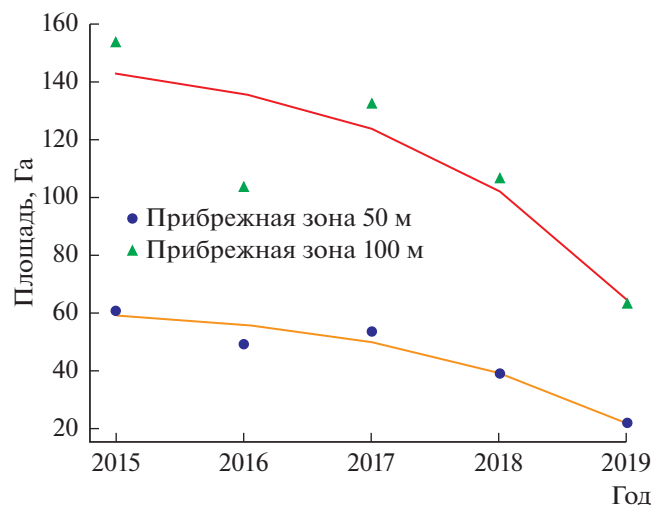


Рис. 2. Результаты картографирования и их аппроксимация.

разности значений стока реки за месяцы вегетации между базовым и нормализуемым снимками. Дополнительным источником погрешностей является высокая мозаичность картографируемых тематических классов, требующая увеличения пространственного разрешения спутниковых снимков. В данном случае это особенно актуально для участков поймы, которые зарастают одиночными кустами ивы, у которых размер проективного покрытия кроны меньше пространственного разрешения снимков Sentinel-2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нарушение водного режима и эвтрофикация рек приводит к деградации пойменных болот, которые зарастают тростником и древесно-кустарниковой растительностью. Данная проблема ак-

туальна для особо охраняемых водно-болотных природных территорий Беларуси, на которых происходит сокращение площади естественных фитоценозов пойменных болот, прежде всего осоковых фитоценозов.

В настоящей работе для прибрежной полосы реки Ясельда на территории Споровского биологического заказника показано ежегодное существенное сокращение площади естественных фитоценозов пойменных болот. Данное сокращение более выражено в прибрежной полосе шириной 50 м, чем шириной 100 м, что подтверждает его обусловленность изменением водного режима и трофности реки. В настоящее время уровень грунтовых вод и режим поступления биогенных элементов на Споровских болотах во многом зависят от использования воды расположенными выше по течению реки Ясельда водохранилищем “Селец” и рыбхозом. Для сохранения естественных фитоценозов пойменных болот Споровского биологического заказника необходимо стабилизировать уровень и трофность грунтовых вод на его территории путем стабилизации водного режима и трофности реки Ясельда.

В работе также установлено, что точность радиометрической нормализации путем коррекции смещения значений пикселей относительно ноля для атмосферно скорректированных снимков Sentinel-2 пойменного торфяника можно оценить по разности между базовым и нормализуемым снимками значений стока реки за месяцы вегетации. Года с более близкими значениями водности реки Ясельда к году базового снимка характеризуются меньшими значениями СКП картографирования тематических классов. Можно ожидать выполнение данной зависимости для других пойменных болот с существенным межгодовым колебанием летнего стока реки.

Таблица 11. Динамика аппроксимированных значений 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

Таблица 12. Сток реки Ясельда до гидропоста Сенин за июнь-сентябрь

Сток	2015 год	2016 год	2017 год	2018 год	2019 год
км ³	0.032	0.142	0.122	0.063	0.062
% от многолетнего	26	123	102	52	52

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Водный кодекс Республики Беларусь. 30 апреля 2014 г. № 149-З: принят Палатой представителей 2 апреля 2014 г.; одобрен 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.
- Государственный водный кадастр. Водные ресурсы, их использование и качество вод (за 2015 год) / Минприроды Респ. Беларусь, Минздрав Респ. Беларусь, РУП “ЦНИИКИВР”. Мн., 2016. 172 с.
- Государственный водный кадастр. Водные ресурсы, их использование и качество вод (за 2016 год) / Минприроды Респ. Беларусь, Минздрав Респ. Беларусь, РУП “ЦНИИКИВР”. Мн., 2017. 223 с.
- Государственный водный кадастр. Водные ресурсы, их использование и качество вод (за 2017 год) / Минприроды Респ. Беларусь, Минздрав Респ. Беларусь, РУП “ЦНИИКИВР”. Мн., 2018. 222 с.
- Государственный водный кадастр. Водные ресурсы, их использование и качество вод (за 2018 год) / Минприроды Респ. Беларусь, Минздрав Респ. Беларусь, РУП “ЦНИИКИВР”. Мн., 2019. 221 с.
- Государственный водный кадастр. Водные ресурсы, их использование и качество вод (за 2019 год) / Минприроды Респ. Беларусь, Минздрав Респ. Беларусь, РУП “ЦНИИКИВР”. Мн., 2020. 223 с.
- Груммо Д.Г., Зеленкевич Н.А., Мойсейчик Е.В., Созинов О.В., Цвирко Р.В., Жилинский Д.Ю. Структура и динамика растительности пойменного болота под влиянием кошения // Современные концепции и практические методы сохранения фиторазнообразия: материалы Междунар. науч.-практ. семинара. 1–4 октября 2019. Минск–Гродно, Беларусь, 2019. С. 145–150.
- 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.
- Поклад Г.Г., Груднев С.П., Попов Б.А. Инженерная геодезия: учебное пособие для вузов. Москва, Берлин: ДиректМедиа, 2020. 497 с.
- 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.
- 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. V. 5. P. 3053–3055.
- 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.
- Brodu N. Super-Resolving Multiresolution Images With Band-Independent Geometry of Multispectral Pixels // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2017. V. 55. № 8. P. 4610–4617.
- Chang C.C., Lin C.J. LIBSVM: a library for support vector machines // ACM Trans. Intell. Syst. Technol. 2011. V. 2. Iss. 3. art. 27. P. 1–27.
- Cohen J. A coefficient of agreement for nominal scales // Educ. Psychol. Meas. 1960. V. 20. № 1. P. 37–46.
- Copernicus Open Access Hub (Electronic resource). 2021. Mode of access: <https://scihub.copernicus.eu/> Date of access: 21.10.2021.
- Haslam S.M. The performance of Phragmites communis Trin. in relation to water-supply // Ann. Bot. 1970. V. 34. Iss. 4. P. 867–877.
- Hsu C.W., Chang C.C., Lin C.J. A practical guide to support vector classification. 2003. Last updated: May 19, 2016. 16 p.
- Jackson J. Sentinel-2 L1C Data Quality Report Issue 72 (January 2022) [Electronic resource]. 09.02.2022. Mode of access: <https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/4766914/OMPC.CS.DQR.001.01-2022+-+i72r0+-+MSI+L1C+DQR+January+2022.pdf>. Date of access: 21.04.2022.
- Mayer B., Kylling A. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use // Atmos. Chem. Phys. 2005. V. 5. P. 1855–1877.
- OpenStreetMap contributors. [Electronic resource]. 2021. Mode of access: <https://planet.openstreetmap.org> Date of access: 21.10.2021.
- QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation. [Electronic resource]. 2021. Mode of access: <http://qgis.org> Date of access: 21.10.2021.
- Richter R., Schläpfer D. Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery: ATCOR-2/3 UserGuide. DLR IB 565-01/15. 2016. 263 p.
- 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. V. 9. № 7. P. 676–701.
- 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.
- Tucker C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sens. Environ. 1979. V. 8. Iss. 2. P. 127–150.

Satellite Mapping of the Area Dynamics of Native Phytocenosis in the Yaselda River Riparian Zone

A. A. Yanovskiy

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

The paper describes the methodological foundations and results of the area dynamics mapping of natural phytocenoses of floodplain marshes of the Yaselda River on the territory of the Sporovsky biological reserve. An annual significant reduction in their area is shown due to changes in the water regime and trophicity of the river. It has been established that the accuracy of radiometric normalization by correcting the offset of pix-

el values relative to zero for atmospherically corrected Sentinel-2 images of the floodplain marshes can be estimated from the difference between the base and normalized images in river runoff values for the growing season.

Keywords: satellite mapping, floodplain marshes plant communities, satellite images radiometric normalization, Sentinel-2

REFERENCES

- Vodnyj kodeks Respubliki Belarus' [Water Code of the Republic of Belarus]. 30 aprlja 2014 g. № 149-Z: prinjat Palatoj predstavitelej 2 aprlja 2014 g.: odobr. Sovetom Resp. 11 aprlja 2014 g. (Jelektronnyj resurs) // JeTALON. Zakonodatel'stvo Respubliki Belarus' / Nac. centr pravovoj inform. Resp. Belarus'. Rezhim dostupa: <https://etalonline.by/document/?regnum=hk1400149> Data dostupa: 21.10.2021. (In Russian).
- Gosudarstvennyj vodnyj kadastr. Vodnye resursy, ih ispol'zovanie i kachestvo vod (za 2015 god) [State water cadastre. Water resources, their use and water quality (for 2015 year)] / Minprirody Resp. Belarus', Minzdrav Resp. Belarus', RUP "CNIKIVR". Mn., 2016. 172 s. (In Russian).
- Gosudarstvennyj vodnyj kadastr. Vodnye resursy, ih ispol'zovanie i kachestvo vod (za 2016 god) [State water cadastre. Water resources, their use and water quality (for 2016 year)] / Minprirody Resp. Belarus', Minzdrav Resp. Belarus', RUP "CNIKIVR". Mn., 2017. 223 s. (In Russian).
- Gosudarstvennyj vodnyj kadastr. Vodnye resursy, ih ispol'zovanie i kachestvo vod (za 2017 god) [State water cadastre. Water resources, their use and water quality (for 2017 year)] / Minprirody Resp. Belarus', Minzdrav Resp. Belarus', RUP "CNIKIVR". Mn., 2018. 222 s. (In Russian).
- Gosudarstvennyj vodnyj kadastr. Vodnye resursy, ih ispol'zovanie i kachestvo vod (za 2018 god) [State water cadastre. Water resources, their use and water quality (for 2018 year)] / Minprirody Resp. Belarus', Minzdrav Resp. Belarus', RUP "CNIKIVR". Mn., 2019. 221 s. (In Russian).
- Gosudarstvennyj vodnyj kadastr. Vodnye resursy, ih ispol'zovanie i kachestvo vod (za 2019 god) [State water cadastre. Water resources, their use and water quality (for 2019 year)] / Minprirody Resp. Belarus', Minzdrav Resp. Belarus', RUP "CNIKIVR". Mn., 2020. 223 s. (In Russian).
- Grummo D.G., Zelenkevich N.A., Mojsejchik E.V., Sozinov O.V., Cvirko R.V., Zhilinskij D.Ju. Struktura i dinamika rastitel'nosti pojmenogo bolota pod vlijaniem koshenija [Structure and dynamics of floodplain fen vegetation under the influence of harvesting] // Sovremennye koncepcii i prakticheskie metody sohraneniya fitoraznoobrazija : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. seminar. 1-4 oktjabrja 2019. Minsk-Grodno, Belarus', 2019. S. 145–150. (In Russian).
- Nacional'naja sistema monitoringa okružhajushhej sredy Respubliki Belarus': rezul'taty nabljudenij, 2020 god [National environmental monitoring system of the Republic of Belarus: observation results, 2020] / Pod obshh. red. E.P. Bogodjazh. Mn., Respublikanskij centr po gidrometeorologii, kontrolju radioaktivnogo zagrjaznenija i monitoringu okružhajushhej sredy. 2021. 591 s. (In Russian).
- Poklad G.G., Gridnev S.P., Popov B.A. Inzhenernaja geodezija [The engineering geodesy] : uchebnoe posobie dlja vuzov. Moskva, Berlin : DirektMedia, 2020. 497 s. (In Russian).
- Priroda Belarusi. Jenciklopedija [Nature of Belarus. Encyclopedia]. V 3 t. / Redkol.: V.Ju. Aleksandrov [i dr.]; Gl. red. T.V. Belova. Mn.: Belorusskaja jenciklopedija, 2010. T. 2. Klimat i voda. 504 s. (In Russian).
- 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. V. 5. P. 3053–3055.
- Bannari A., Ozbaldur 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.
- Brodu N. Super-Resolving Multiresolution Images With Band-Independent Geometry of Multispectral Pixels // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2017. V. 55. № 8. P. 4610–4617.
- Chang C.C., Lin C.J. LIBSVM : a library for support vector machines // ACM Trans. Intell. Syst. Technol. 2011. V. 2. Iss. 3. art. 27. P. 1–27.
- Cohen J. A coefficient of agreement for nominal scales // Educ. Psychol. Meas. 1960. V. 20. № 1. P. 37–46.
- Copernicus Open Access Hub (Electronic resource). 2021. Mode of access: <https://scihub.copernicus.eu/> Date of access: 21.10.2021.
- Haslam S.M. The performance of Phragmites communis Trin. in relation to water-supply // Ann. Bot. 1970. V. 34. Iss. 4. P. 867–877.
- Hsu C.W., Chang C.C., Lin C.J. A practical guide to support vector classification. 2003. Last updated: May 19, 2016. 16 p.
- Jackson J. Sentinel-2 L1C Data Quality Report Issue 72 (January 2022) [Electronic resource]. – 09.02.2022. – Mode of access: <https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/4766914/OMPC.CS.DQR.001.01-2022+-+i72r0+-+MSI+L1C+DQR+January+2022.pdf>. Date of access: 21.04.2022.
- Mayer B., Kylling A. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations – description and examples of use // Atmos. Chem. Phys. 2005. V. 5. P. 1855–1877.
- OpenStreetMap contributors. [Electronic resource]. 2021. Mode of access: <https://planet.openstreetmap.org> Date of access: 21.10.2021.
- QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation. [Electronic resource]. 2021. Mode of access: <http://qgis.org> Date of access: 21.10.2021.
- Richter R., Schläpfer D. Atmospheric/Topographic Correction for Satellite Imagery: ATCOR-2/3 UserGuide. DLR IB 565-01/15. 2016. 263 p.
- 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. V. 9. № 7. P. 676–701.
- 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.
- Tucker C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sens. Environ. 1979. V. 8. Iss. 2. P. 127–150.