УДК 574.47:004.93¹¹

DOI 10.21685/2500-0578-2021-3-1

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ ЛУГОВ ОХРАННОЙ ЗОНЫ ПОЛИСТОВСКОГО ЗАПОВЕДНИКА

А. Ф. Комарова¹, В. П. Бородулина², А. Г. Зудкин³, О. В. Чередниченко⁴

¹ Российское отделение Гринпис, Россия, 125040, г. Москва, Ленинградский пр., 26

^{2, 3, 4} Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

¹ komanka@yandex.ru, ² valentinka_bo@yandex.ru, ³ azudkin@yandex.ru, ⁴ gentiana07@yandex.ru

Аннотация. Актуальность и цели. Травяные сообщества умеренной зоны обладают высоким биологическим разнообразием, поэтому важна оценка их состояния и распространения. Однако для таких сообществ на территории Европейской России слабо изучены закономерности пространственного распределения и экологии и не в полной мере разработана синтаксономия. Мы поставили цель классифицировать травяную растительность Полистовского заповедника до уровня союзов и выявить закономерности их пространственного распределения с использованием традиционных геоботанических методов и картографирования по данным дистанционного зондирования Земли. **Материалы и методы.** В основе работы – 278 геоботанических описаний в окрестностях Полистовского заповедника (Псковская область) и 11 сцен Sentinel-2 (2018–2019). На основе геоботанических описаний предложен продромус травяной растительности, проведена ординация. 243 предиктора использовались для классификации их космических снимков методом Random forest. Полученные картосхемы валидированы по случайно распределенным точкам по снимкам с квадрокоптера (разрешение 1,5–2 см/пиксель); в валидационных точках синтаксоны растительности устанавливали при помощи дешифрирования диагностических видов растений на снимках, сделанных с квадрокоптера. **Результаты.** Представлен продромус, получены картосхемы распределения классов и союзов. Точность картосхем составила 83 % для классов и 87,3 % для союзов. Сообщества хорошо разделяются в ординационных осях (ДСА, шкалы Элленберга, 73,9 % дисперсии). **Выводы.** Союзы травяной растительности хорошо дешифрируются на основе временных серий снимков Sentinel-2. Особенности дешифрирования сообществ объясняются их экологией. Наибольшие площади занимают сообщества класса *Molinio-Arrhenatheretea*, наиболее ценные луга союза *Molinion caeruleae* в охранной зоне заповедника представлены слабо. Большую часть урочищ занимают сообщества союза *Convolvulo arvensis-Agropyron repentis*.

Ключевые слова: травяная растительность, эколого-флористическая классификация, Полистовский заповедник, метод деревьев решений, дистанционное зондирование Земли

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-34-00786. Полевые работы в 2012 и 2014 годах были проведены в рамках госзадания МГУ № 01201157316, работа над текстом статьи О. В. Чередниченко выполнена в рамках госзадания МГУ № 121032500089-1.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Т. М. Гавриловой за помощь в сборе полевых данных.

Для цитирования: Комарова А. Ф., Бородулина В. П., Зудкин А. Г., Чередниченко О. В. Картографирование и анализ пространственного распределения растительных сообществ лугов охранной зоны Полистовского заповедника // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2021. Vol. 6 (3). <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2021-3-1>

MAPPING AND SPATIAL DISTRIBUTION ANALYSIS OF HERBACEOUS VEGETATION IN THE TRANSITION AREA OF POLISTOVSKY RESERVE

A. F. Komarova¹, V. P. Borodulina², A. G. Zudkin³, O. V. Cherednichenko⁴

¹ Greenpeace Russia, 26 Leningradskiy avenue, Moscow, 125040, Russia

^{2, 3, 4} Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskiye gory, Moscow, 119991, Russia

¹ komanka@yandex.ru, ² valentinka_bo@yandex.ru, ³ azudkin@yandex.ru, ⁴ gentiana07@yandex.ru

Abstract. Background. Meadows of the temperate zone are characterized by high biodiversity. Recently their area has been reduced as a result of land use change. Therefore it is important to assess their current state and spatial distribution. However, for the territory of European Russia patterns of spatial distribution are not known, ecology of grasslands is poorly studied, and syntaxonomy is not fully developed. Our aim was to fill this gap using traditional geobotanical methods and mapping with remote sensing data. **Materials and methods.** We use 278

relevés of grasslands made in the vicinity of the Polistovsky Reserve (Pskov Oblast') and 11 scenes of Sentinel-2 (2018–2019). We carried out vegetation classification by floristic criteria, DCA-ordination and calculation of Ellenberg's indicator values. Remote data (Sentinel scenes) were classified by Random forest algorithm using 234 predictors (derivatives of satellite images). The resulting maps were validated with randomly distributed points and drone images. **Results.** The vegetation classification scheme has been developed, maps of the distribution of syn-taxonomical classes and alliances have been obtained. Overall map accuracy was 83 % for classes and 87.3 % for alliances. The gradients of environmental factors that determine the differentiation of vegetation are identified. **Conclusions.** Alliances of herbaceous vegetation are well detected on the basis of time series of Sentinel-2 images. Peculiarities of spatial distribution of these communities are explained by their ecology. The largest areas are occupied by communities of *Molinio-Arrhenatheretea* class due to their high diversity. The most valuable meadows of the *Molinion caeruleae* alliance are poorly represented in the transition zone of the reserve. On the alliance level, the largest areas are occupied by the communities of the *Convolvulo arvensis-Agropyron repentis* alliance.

Keywords: herbaceous vegetation, floristic classification, Polistovsky nature reserve, Random forest, remote sensing of the Earth

Financing. The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 18-34-00786. Field work in 2012 and 2014 was carried out within the framework of the state assignment of Moscow State University No. 01201157316, work on the text of the article by O. V. Cherednichenko was carried out within the framework of the state assignment of Moscow State University No. 121032500089-1.

Acknowledgments. The authors are grateful to T. M. Gavrilova for her help in collecting field data.

For citation: Komarova A.F., Borodulina V.P., Zudkin A.G., Cherednichenko O.V. Mapping and spatial distribution analysis of herbaceous vegetation in the transition area of Polistovsky reserve. *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2021;6(3). (In Russ.). Available from: <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2021-3-1>

Травяные сообщества умеренной зоны представляют собой экосистемы с высоким биологическим разнообразием – таксономическим, функциональным и структурным [1]. Поэтому картографирование и оценка их пространственного распределения представляются критически важными [2, 3]. В последние годы в связи с появлением сенсоров высокого разрешения [4, 5] дистанционные данные стали значительно чаще использоваться для мониторинга травяных сообществ. Однако до сих пор данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) используются в первую очередь для анализа зарастания заброшенных сельскохозяйственных угодий в разных регионах мира [6–8], а картографированию именно травяных сообществ умеренной зоны уделяется мало внимания [9], хотя в целом выявление растительных сообществ – один из подходов оценки биологического разнообразия с использованием данных дистанционного зондирования, особенно актуальный в связи с необходимостью оценки на больших территориях [1].

В настоящее время работы с применением эколого-флористического подхода к классификации травяной растительности на территории России нередки. Тем не менее синтаксономию нельзя считать разработанной. Отдельные синтаксоны рассмотрены на территории европейской части России в Нечерноземье [10–17], в Черноземье [18, 19], в Башкортостане [20–22], в Удмуртии [21]. Ранее нами были проведены исследования наземнейниковых сообществ в охранной зоне Полистовского заповедника [23]. Полная синтаксономия травяных сооб-

ществ Полистовского заповедника пока не разработана. В настоящей работе мы предполагаем частично восполнить этот пробел, предложив классификацию до ранга союза. В том числе остаются неясными и закономерности распределения отдельных синтаксонов. Опубликованные данные о приуроченности растительных сообществ фрагментарны и неполны, для некоторых синтаксонов приводятся очень кратко. Так, луга союза *Arrhenatherion elatioris* располагаются обычно на пологих склонах и незаливаемых речных террасах [24]. Союз *Calthion palustris* обычно представлен в поймах и около водотоков [24]. Сообщества класса *Artemisietea vulgaris* занимают субрудеральные местообитания в населенных пунктах и их окрестностях [25], а сообщества союза *Convolvulo arvensis-Elytrigion repentis* в естественных условиях занимают склоны с оползнями, в сельскохозяйственных ландшафтах – полосы между дорогами, полями и другие антропогенные ландшафты [25]. Растительность класса *Epilobietea angustifolii* обычно представлена на лесных полянах, опушках, обезлесенных в результате пожара территориях [25]. Сообщества формируются по нарушенным местообитаниям: у заборов, на осыпях, по обочинам дорог, склонам карьеров, дамб, на залежах и свалках [25, 26]. Гигрофитные луга союза *Magnocaricion elatae* располагаются во влажных понижениях, в береговой зоне, в неглубоких прибрежных частях водоемов [27–29].

Картографирование синтаксонов актуально для европейской части России, где, с одной стороны, как и во многих европейских странах

значительно сократились площади настоящих лугов [30–34], а с другой стороны – широко представлены заброшенные сельскохозяйственные угодья [35]. Дистанционные данные позволяют косвенно оценить изменение видового биоразнообразия (см. [36, 37]), но аналогичный подход на уровне не видов, а сообществ пока только обсуждается [1], хотя с появлением в свободном доступе временных серий (снимков, снятых в разные моменты времени) Sentinel-2 представляется даже более перспективным [38]. Существуют примеры картографирования растительности [39, 40], но не представлены спектры для отдельных травяных сообществ.

Синтаксоны, выделенные в рамках эколого-флористического подхода, можно рассматривать как «маркеры экологических совокупностей» [41], отражающие условия местообитания. Было показано [40], что синтаксоны эколого-флористического подхода характеризуются большей устойчивостью и выделяются лучше, чем категории доминантной классификации. В нашей работе мы использовали космические снимки Sentinel-2 и сосредоточились на выявлении классов и союзов эколого-флористической классификации, так как пло-

щадь выявляемых контуров растительности должна была быть значительно больше разрешения используемых снимков [3]. Данные более высокого пространственного разрешения не всегда более полезны для картографирования травяных сообществ в силу низкого спектрального [2] или временного [38] разрешения.

Таким образом, инвентаризация и картографирование синтаксонов позволяют получить информацию о пространственном распределении союзов травяных сообществ в охранной зоне Полистовского государственного природного заповедника (Псковская область), а также установить основные экологические и спектральные особенности синтаксонов, позволяющие их картографировать по данным дистанционного зондирования Земли.

Материалы и методы

Территория исследования занимает юго-западную часть охранной зоны государственного природного заповедника «Полистовский». Заповедник основан в 1994 году и расположен в восточной части Псковской области (рис. 1).

Рис. 1. Схема расположения участков геоботанических описаний:

A – урочище Несвино; B – урочище Плавница; C – урочище Лебедево; D – урочище Усадьба.
Подложка – космический снимок Sentinel-2A от 3 июня 2018 г., псевдозеленый синтез (12-8-4)

Fig. 1. Layout of geobotanical descriptions sites: A – Nesvino tract; B – Plavnitsa tract; C – Lebedevo tract; D – Usadba tract. Substrate – satellite image Sentinel-2A of June 3, 2018, pseudo green synthesis (12-8-4)

Географические координаты: $57^{\circ}00' - 57^{\circ}20'$ северной широты и $30^{\circ}21' - 30^{\circ}44'$ восточной долготы. Площадь заповедника 37 983 га; площадь охранной зоны 17 297 га [42]. Климат территории умеренно континентальный. Среднемесячная температура января равна $-8,1^{\circ}\text{C}$ (абс. макс. -41°C). Среднемесячная температура июля равна $+17,2^{\circ}\text{C}$ (абс. макс. $+35^{\circ}\text{C}$). Среднегодовое количество осадков – 685 мм/год (данные Холмской метеостанции, цит. по [42]). Территория заповедника находится в северной части зоны хвойно-широколиственных лесов. Большую часть заповедного ядра занимает болотный массив, в охранной зоне значительны площади лугов и залежей [42].

В 2012, 2014, 2018 и 2019 годах в юго-западной части охранной зоны заповедника было выполнено 278 геоботанических описаний на площадках 100 м^2 , заложенных в пределах естественных границ фитоценозов [43] так, чтобы максимально охватить разнообразие растительности, и привязанных с помощью GPS. Проективное покрытие сосудистых растений оценивали в баллах по шкале Браун-Бланке [44]. На основании всего массива данных был выполнен синтаксономический анализ в соответствии с общими установками метода Ж. Браун-Бланке [44]. Выделение групп описаний проведено с использованием кластерного анализа методом гибкой беты ($\beta = -0,25$) (PC-ORD v. 6.0) [45]. Для выделенных групп был проведен анализ индикаторных видов с расчетом коэффициента ϕ [46] и проверкой значимости тестом рандомизации в программном пакете PC-ORD v. 6.0 [46, 47]. Высшие классификационные единицы выделяли согласно продromусу растительности Европы [29]. Диагностические виды указывали по крупным синтаксономическим сводкам [24, 25, 27, 28, 48–50]. Для выявления градиентов ведущих экологических факторов проведена DCA-ординация (PC-ORD v. 6.0) [45]. Полученные оси интерпретированы с использованием экологических шкал Элленберга и Раменского, реализованных в программе EcoScale 5.0 [51]. Коэффициенты корреляции Пирсона между индикаторными значениями экологических шкал и осями ординации рассчитаны тоже в PC-ORD v. 6.0.

Ниже в тексте номенклатура сосудистых растений приведена по [57], названия высших синтаксонов – согласно продromусу растительности Европы [29].

В дальнейшем для обучения алгоритма деревьев решений использовано 203 точки геоботанических описаний. Обученный алгоритм классифицировал, в свою очередь, территорию 4 урочищ (см. рис. 1), в пределах каждого из которых было выполнено не менее 25 геобота-

нических описаний. Классифицируемая территория включала строго травяные сообщества (маска лесов была создана автоматически по данным [52]; кустарники и погрешности маски лесов удалены по весенней съемке урочищ с квадрокоптера с последующим визуальным контролем; ко всем вырезаемым объектам применен буфер в 3 м).

В качестве данных дистанционного зондирования Земли использованы все доступные безоблачные снимки Sentinel-2 за вегетационный период (апрель-сентябрь) 2018 (7 сцен: 5, 26 и 29 мая, 3 июня, 4 и 24 апреля, 8 сентября) и 2019 (4 сцены: 19 и 31 мая, 18 июня, 28 сентября) годов. На основе выбранных сцен в ArcGIS Pro 2.4.0 получены растровые слои вегетационных индексов Кауфа-Томаса (Tasseled Cap), NDVI, NDWI, Red Edge, Chlorophyll Absorption, LAV, NRE и индекса влажности [53–55], а также попарные нормализованные разности между значениями отдельных каналов снимков разных периодов одного года. Все растры были приведены к строго одинаковому расположению пикселей и пространственному разрешению (10 м) методом бикубической интерполяции. В общей сложности в базу данных, по которой проводились обучение и классификация, было включено 243 предиктора, полученных на основе спектральных характеристик растров. Для каждого используемого в дистанционном анализе геоботанического описания с известными координатами и синтаксономическим статусом (принадлежность к классу и союзу) был определен набор значений всех предикторов.

Обучение и классификация выполнены в R 3.6.1 с помощью пакета randomForest [56]. На этапе обучения массив 203 геоботанических описаний с известным синтаксономическим статусом и набором спектральных предикторов был случайным образом разделен на обучающие и валидационные данные в соотношении 2:1. Несмотря на то, что многие предикторы коррелируют между собой, алгоритм Random forest, являясь кибернетическим, а не статистическим алгоритмом, устойчив к корреляциям [40]. Точность построенных моделей случайных лесов, включающих в каждом случае 500 классификационных деревьев, была проверена по валидационным геоботаническим описаниям и составила около 79 % для классов и 75 % для союзов. Затем на основе полученных моделей, описывающих соотношения между синтаксонами (по отдельности – классами и союзами) и спектральными предикторами, был классифицирован весь массив пикселей для всей территории выбранных четырех урочищ. Библиотека R-Bridge for ArcGIS позволила экспортировать результаты классификации в

ArcGIS Pro. Дополнительно с помощью функции VarImpPlot и парного теста Уилкоксона определены предикторы, наиболее четко дифференцирующие разные синтаксоны.

Методом валидации картографирования травяной растительности в 4 урочищах послужило сравнение результатов, полученных в каждом урочище, с эталонным массивом точек, случайным образом выбранных на сделанных с квадрокоптера снимках урочищ (в общей сложности 1521 точка). В каждой такой точке принадлежность растительности к союзу определялась экспертно – по диагностическим видам растений, дешифрованным на снимках с квадрокоптера. Съемка всех урочищ проведена в конце июня 2019 года квадрокоптером Phantom 4.2 с высоты 30 м (разрешение полученных снимков варьирует в диапазоне 1,5–2 см/пиксель). Валидационные точки конвертировали в растр разрешением 10 м, привязав его к снимкам Sentinel, затем рассчитали матрицы несоответствий между результатами дешифрования союзов травяной растительности на основе снимков Sentinel и снимков с квадрокоптера.

Результаты

Травяные сообщества на исследованной территории представлены 9 союзами в составе 7 порядков и 4 классов. Ниже приведен список установленных синтаксонов; их характеристика дана в прил. 1.

Класс **PHRAGMITO-MAGNOCARICETEA** Klika in Klika et Novák 1941

Порядок *Magnocaricetalia* Pignatti 1953

Союз *Magnocaricion elatae* Koch 1926

Класс **ARTEMISIETEA VULGARIS** Lohmeyer et al. ex von Rochow 1951

Порядок *Agropyretalia intermedio-repentis* T. Müller et Görs 1969

Союз *Convolvulo arvensis-Agropyrion repentis* Görs 1967

Класс **EPILOBIETEA ANGUSTIFOLII** Tüxen et Preising ex von Rochow 1951

Порядок *Galeopsio-Senecionetalia sylvatici* Passarge 1981 nom. conserv. propos.

Союз *Epilobion angustifolii* Oberd. 1957

Класс **MOLINIO-ARRHENATHERETEA** Tx. 1937

Порядок *Filipendulo ulmariae-Lotetalia uliginosi* Passarge 1975

Союз *Filipendulion ulmariae* Segal ex Westhoff et Den Held 1969

Порядок *Molinietalia caeruleae* Koch 1926

Союз *Calthion palustris* Tx. 1937

Союз *Molinion caeruleae* Koch 1926

Порядок *Arrhenatheretalia elatioris* Tx. 1931

Союз *Cynosurion cristati* Tx. 1947

Союз *Arrhenatherion elatioris* Luquet 1926

Порядок *Potentillo-Polygonetalia avicularis* Tx. 1947

Союз *Potentillion anserinae* Tx. 1947

В результате классификации пикселей космических снимков на основе набора спектральных предикторов получены картосхемы распределения классов и союзов (рис. 2) для каждого из урочищ. Картосхемы отражают распределение сообществ на 134 га из 510 га общей площади заброшенных сельхозугодий на территории Полистовского заповедника и его охранной зоны. Алгоритм Random Forest выделил все 4 класса и 9 союзов. Общая точность выделения классов (для всех урочищ) составила 83 %, союзов – 87,3 %, показатели User Accuracy и Producer Accuracy составляют в среднем 83 % и 61 % для классов, 79 % и 79 % для союзов соответственно. Вместе с тем точность выделения классов и союзов сильно различается (прил. 2, табл. 1, 2).

Большинство союзов хорошо распознается с квадрокоптера благодаря видам растений, узнаваемым на снимках. В ряде случаев для валидации дешифрования синтаксонов по этим видам мы учитывали их обилие. Сообщества союза *Magnocaricion elatae* мы распознавали по видимым на снимках зарослям *Calamagrostis canescens*, которые имели зеленый цвет (иногда с буроватым оттенком) и однородную кочковатую структуру. Для узнавания союза *Convolvulo arvensis-Agropyrion repentis* использовали следующие виды: *Cirsium arvense* (на снимках видны заросли и отдельные цветущие особи), *Anthriscus sylvestris* (заросли), *Elytrigia repens* (заросли сизого цвета). Союз *Epilobion angustifolii* хорошо отличается по зарослям доминантов сообществ – *Chamaenerion angustifolium* и *Calamagrostis epigeios*. Союз *Filipendulion ulmariae* – по наличию *Filipendula ulmaria*, у этого вида на снимках хорошо видны цветущие особи. На снимках сообществ союза *Calthion palustris* хорошо видны «кочки» плотнoderновинного злака *Festuca arundinacea*. Этот вид не входит в число классических диагностических видов этого союза, но на нашей территории он имел высокую встречаемость в сообществах союза *Calthion*, и на снимках в них были видны скопления его дерновин. Союз *Molinion caeruleae* мы распознавали по сочетанию *Gladiolus imbricatus* (отдельные цветущие особи, иногда скопления) и *Hieracium umbellatum* (цветущие особи с высоким обилием). На снимках сообществ *Cynosurion cristati* не было видно видов, которые можно было бы

считать характерными, поэтому мы распознавали этот союз по критерию отсутствия характерных видов других союзов. Союз *Arrhenatherion elatioris* распознавали по сочетанию скоплений цветущих особей *Galium mollugo* и *Thalictrum lucidum*. На снимках союза *Potentillion anserinae*, включающего сообщества с доминированием ситника, особи отдель-

ных видов не были различимы, но эти сообщества хорошо выделялись, так как они были видны как более темные, чем фоновые сообщества, пятна с четкими границами. В отличие от сообществ союза *Magnocaricion* эти фитоценозы имели более четкие границы и более темный цвет на снимках, зачастую с фиолетовым оттенком.

Рис. 2. Схема распределения классов (I) и союзов (II) травяной растительности по территории урочищ:
А – урочище Несвино; В – урочище Плавница; С – урочище Лебедево; D – урочище Усадьба. Установленные классы: 1 – *Phragmito-Magnocaricetea*; 2 – *Molinio-Arrhenatheretea*; 3 – *Artemisietea vulgaris*; 4 – *Epilobietea angustifolii*; союзы: 1 – *Magnocaricion elatae*; 2 – *Potentillion anserinae*; 3 – *Cynosurion cristati*; 4 – *Filipendulion ulmariae*; 5 – *Calthion palustris*; 6 – *Molinion caeruleae*; 7 – *Arrhenatherion elatioris*; 8 – *Convolvulo arvensis-Agropyron repentis*; 9 – *Epilobion angustifolii*

Fig. 2. Layout of classes (I) and unions (II) of herbal vegetation over the territory of tracts: A – Nesvino tract; B – Plavnitsa tract; C – Lebedevo tract; D – Usadba tract. Identified classes: 1 – *Phragmito-Magnocaricetea*; 2 – *Molinio-Arrhenatheretea*; 3 – *Artemisietea vulgaris*; 4 – *Epilobietea angustifolii*; союзы: 1 – *Magnocaricion elatae*; 2 – *Potentillion anserinae*; 3 – *Cynosurion cristati*; 4 – *Filipendulion ulmariae*; 5 – *Calthion palustris*; 6 – *Molinion caeruleae*; 7 – *Arrhenatherion elatioris*; 8 – *Convolvulo arvensis-Agropyron repentis*; 9 – *Epilobion angustifolii*

Поскольку в целом (для трех урочищ из четырех) классификация до уровня союзов дала более точный результат, чем классификация до класса, для оценки пространственного распре-

деления использовались картосхемы распределения союзов. Средняя площадь участков, занятых одним синтаксоном, и общая площадь синтаксонов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Пространственные характеристики и распределение синтаксонов по урочищам

Spatial characteristics and distribution of syntaxa by tracts

Класс	Союз	Характерная (средняя) площадь синтаксона, м ²	Урочища, площадь синтаксонов (га)				Общая площадь синтаксона в обследованных урочищах, га
			Несвино	Плавница	Лебедево	Усадьба	
<i>Phragmito-Magnocaricetea</i>	<i>Magno-Caricion elatae</i>	323±57	1,08	0,26	2,29	0,11	3,74
<i>Molinio-Arrhenatheretea</i> , общая площадь			32,1	7,58	17,28	24,88	81,84
в том числе:	<i>Potentillion anserinae</i>	457±161	0	0	0	0,64	0,64
	<i>Cynosurion cristati</i>	3111±1912	0,07	0,07	0,5	23,31	23,95
	<i>Filipendulion ulmariae</i>	482±131	1,26	0,02	0,31	0	1,59
	<i>Calthion palustris</i>	1695±787	0,65	0	15,27	0,01	15,93
	<i>Molinion caeruleae</i>	693±240	0,01	6,95	0,01	0,03	7
	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	1537±760	30,11	0,54	1,19	0,89	32,73
<i>Artemisietea vulgaris</i>	<i>Convolvulo arvensis-Agropyron repentis</i>	1746±771	15,86	12,57	7,34	1,76	37,53
<i>Epilobietea angustifolii</i>	<i>Epilobion angustifolii</i>	700±150	0,15	6,89	0,04	2,23	9,31
Общая площадь урочища, га (за исключением кустарников)			49,19	27,3	26,95	28,98	132,42

Значимость предикторов для классификации оценивалась функцией VarImpPlot. На рис. 3 приведены бинплот-диаграммы значений наиболее значимых предикторов для разных классов и союзов. Подробнее с результатами VarImpPlot и анализа предикторов можно ознакомиться в прил. 2.

Важные для дешифрирования предикторы индивидуальны для синтаксонов растительности. В идентификации классов наибольшее значение имеет яркость (Brightness). В течение периода активной вегетации (июнь – начало августа) яркость рудеральных сообществ (*Artemisietea vulgaris* и *Epilobietea angustifolii*) выше, чем для остальных двух классов. Индексы, отражающие влажность поверхности (их использовалось три: Tasseled Cup Wetness, Moisture и NDWI), дают интересную картину, для объяснения которой необходимы дополнительные исследования. Экологический смысл этих индексов несколько различается: NDWI характеризует в первую очередь содержание влаги в тканях растений, в то время как Moisture и Wetness – влажность грунта на участке; последний в большой степени зависит от характеристик рельефа и самого грунта. При этом индексы Moisture и Wetness скоррелированы между собой – как по литературным данным

[58], так и в нашем случае. Из характерных особенностей индексов Moisture и Wetness можно отметить более высокие значения для рудеральных сообществ в мае 2018 года (в 2019 году такого эффекта не наблюдается), а также чуть более низкие значения для *Phragmito-Magnocaricetea* в мае 2018 года и значимо более низкие – в июне 2019 года. В остальные периоды значения этих индексов в разных сообществах значимо не отличались. Низкие значения для *Phragmito-Magnocaricetea* и высокие для рудеральных сообществ – результат не предполагавшийся, и для его объяснения были бы полезны данные за другие периоды. Поскольку результат неустойчив, возможно, он связан с условиями конкретного года. Также может влиять необходимость коррекции с учетом положения в рельефе (например, возможно, для *Phragmito-Magnocaricetea*, расположенных в локальных понижениях, на самом деле выше индексы в другие периоды, кроме мая и июня разных лет, а в эти месяцы отличие недостоверно – т.е. в мае и июне влажность одинаковая, а позже сообщества *Phragmito-Magnocaricetea* выглядят как более влажные). Также у *Phragmito-Magnocaricetea* меньше индексы Greenness («зеленость») и Chlorophyll absorption. По продуктивности (NDVI) лидируют

рудеральные классы, и разница между ними значима только в конце мая – начале июня 2018 года. Индекс NDWI (содержание влаги) снижается в ряду *Phragmito-Magnocaricetea* – *Molinio-Arrhenatheretea* – *Artemisietea vulgaris* – *Epilobietea angustifolii* за исключением граничных периодов вегетационного сезона – начала мая и августа-сентября, когда в лидеры по этому признаку выходит *Molinio-Arrhenatheretea* (впрочем, как правило, различия недостаточно значимы). Зато в начале сезона (особенно в 2018 году) NDWI для обоих рудеральных классов достоверно ниже, чем для *Phragmito-*

Magnocaricetea и *Molinio-Arrhenatheretea* – возможно, это связано с наличием ветоши. С другой стороны, в 2019 году для *Epilobietea angustifolii* это различие недостоверно. Возможно, ветошь (преимущественно вейник наземный) была уничтожена в результате массовых травяных палов, которые случились ранней весной 2019 года в урочище Плавница, где наиболее распространены эти сообщества. В конце сентября 2019 года класс *Epilobietea angustifolii* уже снова характеризуется наименьшими значениями NDWI.

Рис. 3. Бинплот-диаграммы распределения значений важнейших спектральных предикторов (жирная горизонтальная линия – медиана, боксы иллюстрируют квартильный разброс, усы включают 95 % разброс значений, тонкие кривые – фактическое распределение): А – для разных классов; Б – для союзов. Классы и союзы обозначены теми же номерами, что в легендах на рис. 2. Обозначения: Bri_<дата снимка> – индекс Brightness Кауфа – Томаса, NDWI<дата снимка> – индекс NDWI, S<дата снимка>B<номер канала> – значения отражения в спектральном канале, B<номер канала>_<дата снимка 1 в формате гмдд><дата снимка 2 в формате гмдд> – разница между отражением в одном спектральном канале в разные даты

Fig. 3. Binplot diagrams of the distribution of the values of the most important spectral predictors (bold horizontal line – median, boxes illustrate quartile spread, whiskers include 95% spread of values, thin curves – actual distribution): A – for different classes; B – for unions. Classes and unions are designated by the same numbers as in captions in Fig. 2. Designations: Bri_<image date> – Kauf – Thomas Brightness index, NDWI <image date> – NDWI index, S <image date> B <channel number> – reflection values in the spectral channel, B <channel number>_<date Image 1 in ymdd format> <date of image 2 in ymdd format> – the difference between the reflection in one spectral channel on different dates

Ординационный анализ выявил экологическое своеобразие установленных нами синтаксонов как на уровне классов, так и на уровне союзов. Две оси ординации отражают комплексные градиенты экологических факторов, влияющих на дифференциацию континуума травяной растительности на территории Поли-

стовского заповедника. Были вычислены коэффициенты детерминации, отражающие долю дисперсии, которую объясняет каждая из осей. Для построенной DCA-ординации оси суммарно объясняют 73,9 % дисперсии. На долю первой оси приходится 49,3 % общей дисперсии, на долю второй – несколько меньше (24,6 %).

Положительную корреляционную связь с первой осью показали индикаторные значения фактора влажности почвы по шкалам Элленберга (рис. 4, табл. 2). Отрицательная корреляция была выявлена между первой осью и индикаторными значениями фактора пастбищной дигрессии. Вторая ось показала отрицательную

корреляционную связь с факторами богатства почвы элементами минерального питания и кислотности почвы по шкалам Элленберга. Эти факторы имеют меньшее значение для дифференциации травяной растительности, так как отражающая их ось 2 объясняет меньшую часть дисперсии.

Рис. 4. Ординационная диаграмма описаний травяной растительности на территории заповедника на уровне классов:

1 – *Phragmito-Magnocaricetea*; 2 – *Molinio-Arrhenatheretea*; 3 – *Artemisietea vulgaris*; 4 – *Epilobietea angustifolii*; союзов: 1 – *Magnocaricion elatae*; 2 – *Potentillion anserinae*; 3 – *Cynosurion cristati*; 4 – *Filipendulion ulmariae*; 5 – *Calthion palustris*; 6 – *Molinion caeruleae*; 7 – *Arrhenatherion elatioris*; 8 – *Convolvulo arvensis-Agropyrion repentis*; 9 – *Epilobion angustifolii* (факторы по шкалам Элленберга: F – увлажнения почвы; N – богатства почвы элементами минерального питания; R – кислотности почвы; факторы по шкалам Раменского: PD – пастбищной дигрессии)

Fig. 4. Ordinal diagram of descriptions of herbaceous vegetation on the territory of the reserve at the class level:

1 – *Phragmito-Magnocaricetea*; 2 – *Molinio-Arrhenatheretea*; 3 – *Artemisietea vulgaris*; 4 – *Epilobietea angustifolii*; союзов: 1 – *Magnocaricion elatae*; 2 – *Potentillion anserinae*; 3 – *Cynosurion cristati*; 4 – *Filipendulion ulmariae*; 5 – *Calthion palustris*; 6 – *Molinion caeruleae*; 7 – *Arrhenatherion elatioris*; 8 – *Convolvulo arvensis-Agropyrion repentis*; 9 – *Epilobion angustifolii* (factors on the Ellenberg scales: F – soil moisture; N – soil richness in elements of mineral nutrition; R – soil acidity; factors on the Ramensky scales: PD – pasture digression)

Таблица 2

Table 2

Корреляция индикаторных значений по экологическим шкалам с осями ординации травяной растительности

Correlation of indicator values on ecological scales with ordination axes of grass vegetation

Экологические шкалы*	Коэффициенты корреляции		Диапазон значений**
	Ось 1	Ось 2	
Шкалы Элленберга			
<i>F</i>	0,740	0,217	4,86–8,33
<i>N</i>	0,245	–0,734	3,28–7,0
<i>R</i>	0,328	–0,350	4,52–7,33
Шкалы Раменского			
<i>PD</i>	–0,598	–0,284	2,5–5,0

* Экологические шкалы: *F* – увлажнения почвы; *N* – богатства почвы элементами минерального питания; *R* – кислотности почвы; *PD* – пастбищной дигрессии. ** Общий диапазон значений в анализируемых описаниях.

Таким образом, в рассмотренном экологическом пространстве ведущими факторами являются влажность, пастбищная дигрессия, а также богатство и реакция почвы. Можно рассматривать несколько экологических рядов сообществ и синтаксонов на градиенте факторов. Первый экологический ряд связан с влажностью, второй – с пастбищной нагрузкой, третий – с богатством и кислотностью почв. Диапазоны варьирования индикаторных значений по этим шкалам приведены в табл. 2.

Наиболее влажные сообщества класса *Phragmito-Magnocaricetea* расположены в правой части ординационной диаграммы, в центре – сообщества гигро-мезофитные, и в левой части расположены мезофитные сообщества (см. рис. 4). На градиенте фактора влажности почв сообщества классов *Artemisietea vulgaris* и *Epilobietea angustifolii* занимают сходное положение, они тяготеют к гигро-мезофитным условиям. В то же время луга класса *Molinio-Arrhenatheretea* имеют гораздо более широкую амплитуду по фактору влажности и занимают местообитания от гигрофитных до мезофитных. На диаграмме отражено, что наиболее гигрофитным союзом этого класса является *Potentillion anserinae*, сообщества которого описаны в обводненных замкнутых понижениях рельефа. Индикаторные значения шкалы пастбищной дигрессии указывают на расположение сообществ, связанных с хозяйственным использованием в настоящем или недавнем прошлом, в левой части диаграммы, что соответствует характеристикам класса *Molinio-Arrhenatheretea*. Отметим, что в субрудеральных сообществах классов *Epilobietea angustifolii* и *Artemisietea vulgaris* степень пастбищной дигрессии была меньше, чем в сообществах класса *Molinio-Arrhenatheretea*, так как растительность первых двух классов на исследованной территории не связана с выпасом [59]. Сообщества *Epilobietea angustifolii* – как правило, заросли вейника наземного, подверженные травяным палам [23]; сообщества *Artemisietea vulgaris* развиваются на месте бывших огородов.

Третий экологический ряд связан с богатством и кислотностью почв: в наиболее богатых местообитаниях развиваются субрудеральные сообщества класса *Artemisietea vulgaris* и класса *Epilobietea angustifolii*, в то время как в самых бедных и кислых условиях формируются влажные сообщества класса *Molinio-Arrhenatheretea*.

Обсуждение

На уровне союзов выявленные синтаксоны в целом укладываются в опубликованные клас-

сификационные схемы. Однако стоит отметить отличия синтаксонов исследуемой территории от описанных в литературе [24, 25, 27, 28, 48–50]. Так, диагностический вид союза *Epilobion angustifolii Calamagrostis epigejos* был хорошо представлен и в союзах класса *Molinio-Arrhenatheretea*, для которых участие вейника наземного не считается характерным [23]. Такая особенность затрудняла идентификацию как вейниковых сообществ союза *Epilobion angustifolii*, так и настоящих лугов со значительным участием вейника. Кроме того, не совсем типичными по сравнению с описанными в литературе являются сообщества союзов *Calthion*, *Molinion*, *Arrhenatherion elatioris*, однако ряд диагностических и константных видов этих союзов представлен хорошо. В сообществах союза *Molinion* сама Молиния голубая не является доминирующим видом и встречена лишь в двух описаниях. Тем не менее мы считаем, что эти луга относятся именно к союзу *Molinion*, так как здесь представлен блок его диагностических видов. Наличием травяных палов также можно объяснить и низкое участие молинии, которая, являясь дерновинным растением, плохо переносит частые выжигания. Таким образом, исследованные луга являются деградирующими из-за травяных палов и прекращения адекватного использования [34]. Можно предположить, что наблюдаемые сейчас сообщества являются временной стадией при переходе к вейниковым сообществам рудерального класса *Epilobietea angustifolii*. Тем не менее эти луга сохранили признаки союза *Molinion*, в том числе высокое видовое богатство и присутствие характерных видов – *Gladiolus imbricatus*, *Gentiana pneumonante* и *Ophioglossum vulgatum*.

Можно отметить некоторые особенности пространственного распределения синтаксонов на уровне классов и союзов, тесно связанные с экологическими характеристиками и особенностями землепользования.

Гигрофитные сообщества союза *Magnocaricion elatae* класса *Phragmito-Magnocaricetea* занимают небольшие площади (2,8 % от общей площади урочищ) (см. табл. 1), которые приурочены к влажным участкам в локальных понижениях и к руслам временных водотоков. Наиболее представлены эти сообщества в урочищах Несвино (узкая полоса между урочищем и болотным массивом и локальные понижения на границах с лесом) (см. рис. 2, IА, IIА) и Лебедево (депрессии рельефа и берега реки Хлавица) (см. рис. 2, IС, IIС). В урочищах Плавница и Усадьба площади гигрофитных сообществ незначительны и связаны в основном с локаль-

ными влажными понижениями (рис. 2, *IB, IIB* и рис. 2, *ID, IID* соответственно).

Субрудеральные сообщества союза *Convolvulo arvensis-Agropyron repentis* класса *Artemisietea vulgaris* занимают второе место по площади после настоящих лугов среди исследуемой травяной растительности (28,4 % от общей площади урочищ) (см. табл. 1) и лучше представлены в заброшенных урочищах (Плавница, Несвино, Лебедево). В урочище Усадьба, которое косили до недавнего времени (последний раз в 2018 году), субрудеральные сообщества представлены небольшими участками нитрофильного высокотравья на границе леса и луга (см. рис. 2, *ID, IID*). В урочищах Несвино и Плавница субрудеральные сообщества занимают центральное положение, вероятно, формируясь на месте бывших поселений на богатых нарушенных почвах (см. рис. 2, *IA, IIA* и рис. 2, *IB, IIB* соответственно). Для большинства описаний есть указания (по устным сообщениям сотрудников заповедника) о том, что субрудеральные сообщества образовались по залежам (на месте бывших огородов, деревенских построек и пр.). В урочище Лебедево субрудеральные сообщества также формируются по залежам (см. рис. 2, *IC, IIC*).

Доля сообществ союза *Epilobion angustifolii* составляет 7 % от общей площади исследованной территории (см. табл. 1), они были описаны в урочище Плавница (см. рис. 2, *IB*). Эти сообщества по экологическим характеристикам сходны с субрудеральной растительностью союза *Convolvulo arvensis-Agropyron repentis* и граничат с ними и настоящими лугами класса *Molinio-Arrhenatheretea* союзов *Molinion caeruleae* и *Arrhenatherion elatioris*. Отмечается, что сообщества наземнейниковых лугов формируются в нарушенных местообитаниях: у заборов, по скатам шоссе, склонам карьеров, дамб, на залежах [26]. Распространение сообществ союза *Epilobion angustifolii* в урочище Плавница связано с весенними травяными палами. Вейник наземный, являясь пирогенным видом, особенно активно разрастается, образуя монодоминантные сообщества после выжигания травы [23, 60]. Наземнейниковые сообщества, являясь достаточно стабильными, тормозят процессы смены сообществ или лесовосстановления [61]. На исследуемой территории сообщества вейника наземного располагались на выровненных участках водораздела, в больших урочищах, окруженных лесом, гранича с фитоценозами классов *Artemisietea vulgaris* и *Molinio-Arrhenatheretea*.

Настоящие луга класса *Molinio-Arrhenatheretea* занимают значительные площади (61,8 %

от исследованной площади) (см. табл. 1). Сообщества класса хорошо представлены как на используемых территориях (ур. Усадьба), так и на неиспользуемых (ур. Несвино, Лебедево) (см. рис. 2, *I*). Исключение составляет урочище Плавница, на котором настоящие луга занимают небольшие площади и располагаются на полянах по краям урочища (см. табл. 1, рис. 2, *IB*). Особое расположение лугов класса *Molinio-Arrhenatheretea* в урочище Плавница может быть связано как с расширением границ субрудеральных сообществ в центре урочища, так и с зарастанием кустарниковой и древесной растительностью по периферии в результате сукцессионных процессов после забрасывания. Также можно предположить, что происходит «наступление» сообществ союза *Epilobion angustifolii* класса *Epilobietea angustifolii* на настоящие луга, обусловленное весенними травяными палами [23]. Настоящие луга в заброшенных урочищах Несвино и Лебедево расположены по периферии урочищ (см. рис. 2, *IA, IC*). В урочище Усадьба луга класса *Molinio-Arrhenatheretea* занимают практически всю площадь, что объясняется сенокосным режимом использования в недавнем прошлом (см. рис. 2, *ID*).

Луга союзов класса *Molinio-Arrhenatheretea* распределены по урочищам неравномерно и имеют разную представленность по площадям (см. табл. 1, рис. 2, *I*). Так, наибольшие площади имеют луга союзов *Arrhenatherion elatioris*, *Molinion caeruleae*, *Calthion palustris*, *Cynosurion cristati*, в то время как сообщества союзов *Potentillion anserinae* и *Filipendulion ulmariae* представлены лишь на небольших участках (около 1 % от общей площади урочищ) (см. табл. 1). Луга разных союзов описаны нами в разных урочищах, что связано как с разными экологическими условиями (что подтверждается ординацией и фитоиндикацией), так и, вероятно, историей использования. К заброшенным участкам приурочены луга следующих союзов: *Arrhenatherion elatioris* (ур. Несвино), *Molinion caeruleae* (ур. Плавница), *Calthion palustris* (ур. Лебедево). Действительно, луга этих союзов расходятся на градиентах экологических факторов как по фактору влажности, так и по факторам богатства и кислотности почв (см. рис. 4). Также к заброшенным урочищам относятся таволговые сообщества союза *Filipendulion ulmariae*, занимающие незначительные по площади участки в локальных понижениях рельефа и временных водотоках (см. табл. 2). Луга союза *Cynosurion cristati* описаны исключительно в косимом урочище Усадьба. Там же встречены сообщества союза *Potentillion anserinae*, они занимают влажные

замкнутые понижения, не пригодные для сенокосения, и окружены сенокосными лугами союза *Cynosurion cristati* (см. рис. 2, IID).

Особенности распознавания синтаксонов на снимках Sentinel алгоритмом дешифрирования и информативность отдельных спектральных предикторов согласованы с экологическими характеристиками синтаксонов (как известными из литературы, так и подтвержденными по результатам ординации). *Molinio-Arrhenatheretea*, будучи очень разнообразным классом, почти не демонстрирует специфических черт. Иными словами, поскольку в пределах этого класса представлены разнообразные по спектральным свойствам сообщества, при дешифрировании на уровне классов все они оказываются в одной группе, спектральные признаки которой «размываются» и редко характеризуются достоверными отличиями. Это объясняет феномен более высокой точности дешифрирования растительности на уровне союзов, чем на уровне классов. При этом входящие в состав *Molinio-Arrhenatheretea* союзы дифференцируются набором предикторов, причем преимущественно отличным от тех, что важны для классов. Для распознавания некоторых союзов оказались важны осенние снимки (например, каналы 7, 8А снимка за 19.09.2019 и индекс Moisture на его основе), не несущие, как иногда считается [62], ценной информации в случае изучения травяных сообществ (прил. 2, табл. 4). Обычно сообщества картографируют в момент их вегетационного оптимума [62], однако в данном случае решающее значение имеет увеличивающаяся разница в отражении и влажности сообществ вне вегетационного оптимума (т.е. на августовских снимках травяная растительность разных союзов различается лучше, так как характерное в конце лета «выгорание» происходит в разных союзах с разной скоростью). Похожий феномен увеличения точности картографирования вне сезона активной вегетации показан ранее [39], но, правда, для площадей, занятых сельскохозяйственными культурами. Также большое значение в дифференциации отдельных синтаксонов имеют нормализованные разницы отражения в разные моменты сезона.

Яркость (Brightness) наиболее информативна в начале и в конце сезона. В начале и в конце сезона максимальные значения яркости характерны для разных сообществ: в начале мая – *Cynosurion cristati*, в конце сентября – *Potentillion anserinae*. Индекс NearRedEdge, представляющий собой соотношение ближнего инфракрасного и красного канала (так называемую «красную границу растительности»),

в начале сезона дает для *Molinion caeruleae* и *Arrhenatherion elatioris* значения, близкие к рудеральным сообществам (классы *Artemisietea vulgaris* и *Epilobietea angustifolii*). В августе значения этого индекса резко снижаются для всех сообществ, особенно для *Potentillion anserinae*, но для *Filipendulion ulmariae* – меньше всего. Аналогичная картина наблюдается для индекса RedEdge2. Влажность на весенних снимках (после повсеместного снеготаяния) мало информативна, а на осенних снимках в 2018 году выделяются не только отличающийся по многим признакам *Potentillion anserinae*, но и *Cynosurion cristati* и *Calthion palustris*, в 2019 году – *Filipendulion ulmariae*. Содержание влаги (NDWI) также более информативно в конце сезона, чем в начале. NDWI за август и сентябрь 2018 года входят в число наиболее значимых предикторов при дешифрировании. В то же время для этого индекса картина существенно отличается по годам: в 2019 году он оказался значительно менее информативен даже в конце сезона. В течение сезона активной вегетации индекс продуктивности (NDVI) сообществ *Potentillion anserinae* и *Cynosurion cristati* значимо ниже, чем в остальных союзах (*Filipendulion ulmariae*, *Calthion palustris*, *Molinion caeruleae*, *Arrhenatherion elatioris*). Для *Molinion caeruleae* значения NDVI в начале лета максимальны и близки к рудеральным сообществам. Далее быстрее всего NDVI снижается в сообществах *Calthion palustris*, и в конце сезона ситуация меняется на противоположную: значения максимальны в сообществах *Potentillion anserinae* и *Cynosurion cristati*.

Как и при дешифрировании классов растительности, информативной для союзов оказалась попарная нормализованная разность между отдельными каналами разновременных снимков, особенно относящихся к разным частям сезона (начало мая/июнь и июнь/август). Особенно значима разность между парами восьмых (за разные даты) и парами вторых спектральных каналов. Различие непосредственно по значениям спектральных каналов для большинства дат недостоверно. Это объясняет, почему на снимках в стандартных вариантах синтеза различие между сообществами визуально не выявляется или выявляется только на уровне «рудеральные/не рудеральные». Для разных сообществ оптимальными по информативности являются разные диапазоны съемки, индексы и даты; кроме того, по-видимому, значимость предикторов зависит от условий конкретного года. Таким образом, невозможно подобрать универсальный оптимальный момент

съемки или предиктор, пригодный для классификации травяных сообществ, что делает принципиально важным использование для подобных исследований устойчивого к множественным корреляциям алгоритма [40].

Полученные результаты (см. прил. 2) подтвердили перспективность дешифрирования по временным сериям снимков Sentinel-2 и спектральных индексов на их основе методом деревьев решений для картографирования синтаксонов травяных сообществ. Также подтвердился ранее отмеченный [40] факт большей устойчивости синтаксонов эколого-флористической классификации в пространстве предикторов, полученных по данным дистанционного зондирования, по сравнению с единицами доминантной классификации. Вероятно, это связано с тем, что и принадлежность к синтаксонам, и общая отражательная способность растительности обусловлены набором экологических факторов, особенно лимитирующих – как избыточное увлажнение [62], определяющее спектральные характеристики в ближнем инфракрасном диапазоне [3].

Существующие примеры картографирования синтаксонов в основном отражают классификационный ранг выше союза [39, 40] (поскольку обе работы выполнены не в рамках подхода Браун-Бланке, однозначно сопоставить не представляется возможным). В работе французских коллег [3] удалось достичь приемлемой точности дешифрирования в 62 % даже для ранга ассоциаций, однако использовались космические снимки Pleiades разрешением 2 м, радарные данные и намного более трудоемкий подход, основанный на нечеткой логике. Согласно предложенной французскими коллегами идее мы применили в своей работе разносезонные снимки, что позволило добиться существенно более высокой точности исключительно по данным Sentinel-2. Таким образом, можно считать, что в нашем случае точность дешифрирования (83 % для классов и 87,3 % для союзов) оказалась пока максимальной среди достигнутых.

В трех урочищах из четырех точность дешифрирования травяной растительности на уровне союзов превышала точность дешифрирования классов. Особенно велика разница для урочища Плавница, которое в целом характеризуется наименьшей точностью дешифрирования. Мы связываем это с большой мозаичностью этого урочища (см. рис. 2) и с высокой представленностью в нем участков с вейником, доминирование которого сказывается на спектральном отклике. В результате картографирования на основе данных дистанционного зон-

дирования разнообразные по спектральному отклику сообщества с вейником все оказались отнесены к классу *Molinio-Arrhenatheretea*. Класс *Molinio-Arrhenatheretea* сам по себе является неоднородным: входящие в него союзы характеризуются разными требованиями к влажности и богатству почвы. При картографировании на уровне союзов выделяются группы с более узким диапазоном спектрального отклика, разные по отклику сообщества оказываются в разных союзах, и общая ошибка снижается. То есть при наличии неравномерно представленных классов в сочетании с трудно дифференцируемыми сообществами алгоритм дешифрирования классов обучается на меньшую глубину, что приводит к большей ошибке. Другими словами, чем более гетерогенна группа, тем выше вероятность возникновения ошибок при обучении, а, следовательно, тем ниже качество обучения алгоритма и хуже финальная классификация. Показательно, что для сообществ с доминированием вейника наземного малая точность дешифрирования классов растительности по дистанционным данным соотносится с тем фактом, что в эколого-флористической классификации такие сообщества также могут относиться к разным классам (см. обзор в [23]). Кроме того, классы представляют сообщества в более широком экологическом диапазоне, а союзы – в более узком, что также дает более высокую точность дешифрирования и картографирования контуров растительности ранга союзов, чем классов.

Таким образом, снимки спутника Sentinel-2 могут служить надежной основой для картографирования травяных сообществ. Эти снимки свободно распространяются Европейским космическим агентством. В основе работы лежит алгоритм Random forest, также свободно доступный, например, в составе распространенного языка статистической обработки R. Все это делает предложенную нами технологию легко реплицируемой и пригодной для использования на других территориях. Однако полевые данные для выявления синтаксонов и обучения модели все равно необходимы. Таким образом, представляется целесообразным рассматривать использование дистанционных данных как пространственно непрерывной основы для экстраполяции полевых данных [9].

Представляет интерес возможность дальнейшего углубления методов дешифрирования до ранга ассоциаций, особенно с использованием тех же снимков Sentinel-2. Особенно важной, как ни парадоксально, эта возможность выглядит для травяных сообществ, так как для них критически важным является использова-

ние данных с высоким временным разрешением [9, 38]. Однако не исключено, что пространственного разрешения Sentinel-2 будет недостаточно для картографирования отдельных ассоциаций – особенно тех, для которых характерно простираание вдоль дорог, опушек и прочих линейных границ (например, союза *Molinion caeruleae*). В работе [3] точность выделения ассоциаций без применения нечеткой логики была неприемлемо низкой (26,1 % и 44,8 % в зависимости от метода), однако исследователи отмечают перспективность использования для решения такой задачи временных серий Sentinel-2. Таким образом, необходима методика дешифрирования дистанционных данных более низкого пространственного разрешения с использованием метрик, полученных на основе данных более высокого разрешения [63] и временных серий, особенно учитывая, что для анализа ретроспективной динамики синтаксонов необходимо использование снимков Landsat. Также для широкого использования технологии необходимо разработать дополнительную процедуру исключения из классифицируемого массива кустарников без использования съемки с квадрокоптера.

Хотя формально растительные сообщества сами по себе являются полноправным компонентом биоразнообразия [1], при изучении его пространственных характеристик с помощью дистанционных данных исследователи все еще сосредоточены на анализе распределения отдельных видов [9, 37]. Мы предполагаем, что переход на более высокий уровень анализа и охраны биоразнообразия – на уровень сообществ – позволит установить принципиально новые закономерности пространственной организации синтаксонов и предложить эффективные подходы к сохранению экосистем.

Заключение

В нашем исследовании мы разработали классификацию травяной растительности типичного культурного ландшафта лесной зоны,

чем закрыли еще одно «белое пятно» в синтаксономии европейской части России.

Космические снимки Sentinel-2 в сочетании с квадрокоптерной съемкой и полевые данные геоботанических описаний позволили нам создать и проанализировать картосхемы распределения синтаксонов ранга союза и класса в охранной зоне государственного природного заповедника Полистовский. В результате впервые для этой территории и для этих синтаксонов выявлены особенности картографирования и спектральные характеристики синтаксонов, предложен реплицируемый алгоритм классификации данных дистанционного зондирования и валидации результата. Мы подтвердили перспективность эколого-флористической классификации растительности с точки зрения картографирования сообществ с использованием ДЗЗ, а также исключительную важность временных серий снимков как основы для картографирования травяной растительности до ранга союза.

Выявленные особенности взаимного расположения сообществ разных классов и союзов значительно дополняют опубликованные в зарубежных работах данные. Основным общим выводом можно считать, что несмотря на длительную (более 30 лет) сукцессию или вследствие ее наиболее ценные луга союза *Molinion caeruleae* в охранной зоне заповедника представлены слабо. Большую часть урочищ занимают сообщества союза *Convolvulo arvensis-Agropyron repentis*.

Травяная растительность на месте заброшенных деревень и сельхозугодий в Центральной России может представлять большую ценность с точки зрения сохранения биологического разнообразия. Кроме того, остается открытым вопрос закономерностей динамики таких сообществ как в смысле видового, так и в смысле экосистемного разнообразия. В связи с этим представляет большой интерес доработка методики для большей ее автоматизации и апробация ее на других участках.

Список литературы

1. Lausch A., Bannehr L., Beckmann M. [et al.]. Linking Earth Observation and taxonomic, structural and functional biodiversity: Local to ecosystem perspectives // Ecological Indicators. 2016. Vol. 70. P. 317–339.
2. Stenzel S., Fassnacht F. E., Mack B., Schmidtlein S. Identification of high nature value grassland with remote sensing and minimal field data // Ecological indicators. 2017. Vol. 74. P. 28–38.
3. Rapinel S., Rossignol N., Hubert-Moy L. [et al.]. Mapping grassland plant communities using a fuzzy approach to address floristic and spectral uncertainty // Applied Vegetation Science. 2018. Vol. 21 (4). P. 678–693.
4. Kuenzer C., Ottinger M., Wegmann M. [et al.]. Earth observation satellite sensors for biodiversity monitoring: potentials and bottlenecks // International Journal of Remote Sensing. 2014. Vol. 35, № 18. P. 6599–6647.
5. Petrou Z. I., Manakos I., Stathaki T. Remote sensing for biodiversity monitoring: a review of methods for biodiversity indicator extraction and assessment of progress towards international targets // Biodiversity and Conservation. 2015. Vol. 24–10. P. 2333–2363.

6. Fassnacht F. E., Li L., Fritz A. Mapping degraded grassland on the Eastern Tibetan Plateau with multi-temporal Landsat 8 data – where do the severely degraded areas occur? // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2015. Vol. 42. P. 115–127.
7. Dara A., Baumann M., Kuemmerle T. [et al.]. Mapping the timing of cropland abandonment and recultivation in northern Kazakhstan using annual Landsat time series // *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 213. P. 49–60.
8. Haller A., Bender O. Among rewilding mountains: grassland conservation and abandoned settlements in the Northern Apennines // *Landscape Research*. 2018. P. 1–17.
9. Wachendorf M., Fricke T., Möckel T. Remote sensing as a tool to assess botanical composition, structure, quantity and quality of temperate grasslands // *Grass and forage science*. 2018. Vol. 73 (1). P. 1–14.
10. Булохов А. Д. Травяная растительность Юго-Западного Нечерноземья России. Брянск : Изд-во БГУ, 2001. 296 с.
11. Семенищенков Ю. А. Фитоценотическое разнообразие Судость-Деснянского междуречья. Брянск : РИО БГУ, 2009. 400 с.
12. Пересторонина О. Н., Савиных Н. П. Пойменные луга реки Вятки южной подзоны тайги Кировской области // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2016. Т. 18. С. 168–171.
13. Щукина К. В. Классификация разнотравных лугов поймы реки Вятки // *Ботанический журнал*. 2012. Т. 97, № 12. С. 1567–1578.
14. Василевич В. И., Щукина К. В. Краткий конспект водной и прибрежно-водной растительности поймы реки Вятки // *Ботанический журнал*. 2013. Т. 98, № 6. С. 715–722.
15. Белоновская Е. А., Тишков А. А., Царевская Н. Г. Луга в системе сохранения традиционного агроландшафта национального парка Валдайский (Новгородская обл.) // *Проблемы региональной экологии*. 2016. № 4. С. 112–121.
16. Волкова Е. М., Ямалов С. М. Разнообразие растительных сообществ разных стадий восстановительных сукцессий степной растительности в Верховьях Дона (Европейская Россия) // *Степи Северной Евразии : материалы VII Междунар. симпозиума. Оренбург, 2015*. 996 с.
17. Королева Н. Е., Копенина Е. И. Луга класса Molinio-Arrhenatheretea Тх. 1937 в пойме р. Варзуга (Мурманская область) // *Растительность России*. 2018. № 34. С. 85–100.
18. Арепьева Л. А. Обзор растительных сообществ железнодорожных насыпей в городах Курской области // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2013. Т. 15, № 3 (2). С. 695–699.
19. Аверинова Е. А. Травяная растительность бассейна реки Сейм (в пределах Курской области). Брянск : РИО БГУ, 2010. 351 с.
20. Григорьев И. Н., Соломещ А. И., Алимбекова Л. М., Онищенко Л. И. Влажные луга Республики Башкортостан: синтаксономия и вопросы охраны. Уфа : Гилем, 2002. 157 с.
21. Ямалов С. М., Баянов А. В. О двух ассоциациях настоящих лугов Северо-Востока Республики Башкортостан // *Растительность России*. 2008. № 13. С. 82–92.
22. Мартыненко В. Б., Ямалов С. М., Жигунов О. Ю., Филинов А. А. Растительность государственного природного заповедника «Шульган-Таш». Уфа : Гилем, 2005. 272 с.
23. Бородулина В. П., Комарова А. Ф., Чередниченко О. В. Наземноейниковые луга в охранной зоне Полистовского заповедника (Псковская область) // *Разнообразие раст. мира*. 2019. Т. 1, № 1. С. 44–61.
24. Chytrý M. Vegetace České republiky 1. Travinná a keříčková vegetace [Vegetation of the Czech Republic. 1. Grassland and heathland vegetation]. Praha : Academia, 2007. 526 p.
25. Chytrý M. Vegetace České republiky 2. Ruderální, plevelová, skalní a suťová vegetace [Vegetation of the Czech Republic 2. Ruderal, Weed, Rock and Scree vegetation]. Praha : Academia, 2009. 520 p.
26. Усманова Л. С., Голованов Я. М., Абрамова Л. М. Синантропная растительность класса Artemisietea vulgaris в центральной части Башкирского Предуралья // *Науч. ведомости. Сер. Естественные науки*. 2014. № 3 (174), вып. 26. С. 9–18.
27. Ермаков Н. Б. Продромус высших единиц растительности России / под ред. Б. М. Миркина, Л. Г. Наумовой // *Современное состояние основных концепций науки о растительности*. Уфа : Гилем, 2012. 488 с.
28. Chytrý M. Vegetace České republiky. 3. Vodní a mokřadní vegetace [Vegetation of the Czech Republic 3. Aquatic and wetland vegetation]. Praha : Academia, 2011. 827 p.
29. Mucina L., Bültmann H., Dierßen K. [et al.]. Vegetation of Europe: hierarchical floristic classification system of vascular plant, bryophyte, lichen, and algal communities // *Applied Vegetation Science*. 2016. Vol. 19. P. 3–264.
30. van Dijk G. The status of semi-natural grasslands in Europe / ed. by P. D. Goriup, L. A. Batten, J. A. Norton // *The conservation of lowland dry grassland birds in Europe : Proceedings of an International Seminar Held at the University of Reading*. 1991. P. 15–35.
31. Знаменский С. Р. Экологическая структура мезофитных луговых сообществ Заонежья (Карелии) : автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2003. 25 с.
32. Rūsiņa S. Diagnostic species of mesophyllous and xerophyllous grassland plant communities in Latvia // *Latvijas Universitātes Raksti. Zemes Un Vides Zinātnes*. 2005. Vol. 685. P. 69–95.
33. Zelnik I., Čarni A. Plant species diversity and composition of wet grasslands in relation to environmental factors // *Biodiversity and Conservation*. 2013. Vol. 22. 2179 p.
34. Dengler J., Janišová M., Török P., Wellstein C. Biodiversity of Palearctic grasslands: a synthesis // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2014. Vol. 182. P. 1–14.

35. Глушков И., Лупачик В., Прищепов А. [и др.]. Картирование заброшенных земель в Восточной Европе с помощью спутниковых снимков Landsat и Google Earth Engine // *Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении, лесном хозяйстве и экологии : доклады VII Всерос. конф. (г. Москва, 22–24 апреля 2019 г.)*. М., 2019. С. 35.
36. Rocchini D., Hernández-Stefanoni J. L., He K. S. Advancing species diversity estimate by remotely sensed proxies: a conceptual review // *Ecological informatics*. 2015. Vol. 25. P. 22–28.
37. Neumann C., Itzerott S., Weiss G. [et al.]. Mapping multiple plant species abundance patterns – A multiobjective optimization procedure for combining reflectance spectroscopy and species ordination // *Ecological Informatics*. 2016. Vol. 36. P. 61–76.
38. Rapinel S., Mony C., Lecoq L. [et al.]. Evaluation of Sentinel-2 time-series for mapping floodplain grassland plant communities // *Remote sensing of environment*. 2019. Vol. 223. P. 115–129.
39. Xu D., Chen B., Shen B. [et al.]. The classification of grassland types based on object-based image analysis with multisource data // *Rangeland Ecology & Management*. 2019. Vol. 72 (2). P. 318–326.
40. Bradter U., O'Connell J., Kunin W. E. [et al.]. Classifying grass-dominated habitats from remotely sensed data: the influence of spectral resolution, acquisition time and the vegetation classification system on accuracy and thematic resolution // *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 711. P. 134584.
41. Миркин Б. М., Наумова Л. Г. Современное состояние основных концепций науки о растительности. Уфа : АН РБ ; Гилем, 2012. 488 с.
42. Решетникова Н. М., Королькова Е. О., Новикова Т. А. Сосудистые растения заповедника «Полистовский» (Аннотированный список видов). Изд-во Комиссии РАН по сохранению биологического разнообразия и ИПЭЭ РАН, 2006. 97 с.
43. Полевая геоботаника. Методическое руководство / под ред. Е. М. Лавренко, А. А. Корчагина. М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1964. Т. 3. 530 с.
44. Braun-Blanquet J. Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde. 3. Auflage. Wien ; N.-Y., 1964. 865 p.
45. McCune B., Mefford M. J. PC-ORD Multivariate Analysis of Ecological Data, Version 6. MjM Software Design. Oregon : Gleneden Beach, 2011. 28 p.
46. Tichý L., Chytrý M. Statistical determination of diagnostic species for site groups of unequal size // *Journal of Vegetation Science*. 2006. Vol. 17. P. 809–818.
47. Peck J. E. Multivariate Analysis for Community Ecologists: Step-by-Step using PC-ORD. MjM Software Design. Oregon : Gleneden Beach, 2010. 162 p.
48. Jarolímek I. Diagnostic, constant and dominant species of the higher vegetation units of Slovakia / ed. by I. Jarolímek, J. Šibík. Bratislava : Veda, 2008. 332 p.
49. Valachovič M. Rastlinné spoločenstvá Slovenska. 3. Vegetácia mokradí / ed. by M. Valachovič. Bratislava : Veda, 2001. 435 p.
50. Hegedüšová Vantarová K. Rastlinné spoločenstvá Slovenska. 5. Travinno-bylinná vegetácia / ed. by K. Hegedüšová Vantarová, I. Škodová. Bratislava : Veda, 2014. 581 p.
51. Грохлина Т. И., Ханина Л. Г. О компьютерной обработке геоботанических описаний по экологическим шкалам // *Математическое моделирование в экологии : материалы Четвертой нац. науч. конф. с междунар. участием (18–22 мая 2015 г.)*. Пушино, 2015. С. 63–64.
52. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R. [et al.]. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change // *Science*. 2013. Vol. 342 (6160). P. 850–853.
53. Pettorelli N., Vik J. O., Mysterud A. [et al.]. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change // *Trends in Ecology and Evolution*. 2005. Vol. 20. P. 503–510.
54. Richards J. A., Jia X. Remote sensing digital image analysis. An introduction. Berlin : Springer, 2006. 439 p.
55. Wu C., Niu Z., Tang Q., Huang W. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation // *Agricultural and forest meteorology*. 2008. Vol. 148 (8-9). P. 1230–1241.
56. Breiman L. Random forests // *Machine learning*. 2001. Vol. 45 (1). P. 5–32.
57. Черепанов С. К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб. : Мир и семья, 1995. 995 с.
58. Jin S., Sader S. A. Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances // *Remote sensing of Environment*. 2005. Vol. 94 (3). P. 364–372.
59. Komarova A., Cherednichenko O., Borodulina V. [et al.]. Grassland communities within abandoned settlements in NW Russia: syntaxa and land use status // *Program and Abstracts 16th Eurasian Grassland Conference (EGC)*. Graz, Austria, 2019. P. 26.
60. Deák B., Valkó O., Török P. [et al.]. Grassland fires in Hungary – Experiences of nature conservationists on the effects of fire on biodiversity // *Appl. Ecology and Environmental Research*. 2014. Vol. 12 (1). P. 267–283.
61. Kutyna I., Młynowski E., Malinowska K. Structure and floristic diversity of the community Calamagrostietum epigeji Juraszek 1928 within different biotopes // *Folia Pomer. Univ. Technol. Stetin., Agric., Aliment., Pisc., Zootech*. 2016. Vol. 325 (37). P. 47–64.
62. Feilhauer H., Thonfeld F., Faude U. [et al.]. Assessing floristic composition with multispectral sensors – A comparison based on monotemporal and multiseasonal field spectra // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2013. Vol. 21. P. 218–229.

63. Hüttich C., Gessner U., Herold M. [et al.]. On the suitability of MODIS time series metrics to map vegetation types in dry savanna ecosystems: A case study in the Kalahari of NE Namibia // Remote sensing. 2009. Vol. 1 (4). P. 620–643.

References

1. Lausch A., Bannehr L., Beckmann M. [et al.]. Linking Earth Observation and taxonomic, structural and functional biodiversity: Local to ecosystem perspectives. *Ecological Indicators*. 2016;70:317–339.
2. Stenzel S., Fassnacht F.E., Mack B., Schmidtlein S. Identification of high nature value grassland with remote sensing and minimal field data. *Ecological indicators*. 2017;74:28–38.
3. Rapinel S., Rossignol N., Hubert-Moy L. [et al.]. Mapping grassland plant communities using a fuzzy approach to address floristic and spectral uncertainty. *Applied Vegetation Science*. 2018;21(4):678–693.
4. Kuenzer C., Ottinger M., Wegmann M. [et al.]. Earth observation satellite sensors for biodiversity monitoring: potentials and bottlenecks. *International Journal of Remote Sensing*. 2014;35(18):6599–6647.
5. Petrou Z.I., Manakos I., Stathaki T. Remote sensing for biodiversity monitoring: a review of methods for biodiversity indicator extraction and assessment of progress towards international targets. *Biodiversity and Conservation*. 2015;24-10:2333–2363.
6. Fassnacht F.E., Li L., Fritz A. Mapping degraded grassland on the Eastern Tibetan Plateau with multi-temporal Landsat 8 data – where do the severely degraded areas occur? *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2015;42:115–127.
7. Dara A., Baumann M., Kuemmerle T. [et al.]. Mapping the timing of cropland abandonment and recultivation in northern Kazakhstan using annual Landsat time series. *Remote Sensing of Environment*. 2018;213:49–60.
8. Haller A., Bender O. Among rewilding mountains: grassland conservation and abandoned settlements in the Northern Apennines. *Landscape Research*. 2018:1–17.
9. Wachendorf M., Fricke T., Möckel T. Remote sensing as a tool to assess botanical composition, structure, quantity and quality of temperate grasslands. *Grass and forage science*. 2018;73(1):1–14.
10. Bulokhov A.D. *Travyanaya rastitel'nost' Yugo-Zapadnogo Nechernozem'ya Rossii* = Herbaceous vegetation of the Southwestern Non-Black Earth Region of Russia. Bryansk: Izd-vo BGU, 2001:296. (In Russ.)
11. Semenishchenkov Yu.A. *Fitotsenoticheskoe raznoobrazie Sudost'-Desnyanskogo mezhdurech'ya* = Phytocenotic diversity of the Sudost-Desnyansky interfluv. Bryansk: RIO BGU, 2009:400. (In Russ.)
12. Perestoronina O.N., Savinykh N.P. Floodplain meadows of the Vyatka river in the southern taiga subzone of the Kirov region. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* = Proceedings of the Samara Research Centre of the Russian Academy of Sciences. 2016;18:168–171. (In Russ.)
13. Shchukina K.V. Classification of forb meadows of the Vyatka river floodplain. *Botanicheskii zhurnal* = Botanical journal. 2012;97(12):1567–1578. (In Russ.)
14. Vasilevich V.I., Shchukina K.V. Brief summary of aquatic and coastal-aquatic vegetation of the Vyatka River floodplain. *Botanicheskii zhurnal* = Botanical journal. 2013;98(6):715–722. (In Russ.)
15. Belonovskaya E.A., Tishkov A.A., Tsarevskaya N.G. Meadows in the system of preserving the traditional agricultural landscape of the Valdai National Park (Novgorod Region). *Problemy regional'noy ekologii* = Problems of regional ecology. 2016;(4):112–121. (In Russ.)
16. Volkova E.M., Yamalov S.M. Diversity of plant communities at different stages of restorative successions of steppe vegetation in the Upper Don (European Russia). *Stepi Severnoy Evrazii: materialy VII Mezhdunar. simpoziuma* = Steppes of Northern Eurasia: proceedings of VII Intern. symposium. Orenburg, 2015:996. (In Russ.)
17. Koroleva N.E., Kopeina E.I. Meadows of the Molinio-Arrhenatheretea Tx. class. 1937 in the floodplain of the Varzuga river (Murmansk region). *Rastitel'nost' Rossii* = Vegetation of Russia. 2018;(34):85–100. (In Russ.)
18. Arep'eva L.A. Review of plant communities of railway embankments in the cities of the Kursk region. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* = Proceedings of the Samara Research Centre of the Russian Academy of Sciences. 2013;15(3):695–699. (In Russ.)
19. Averinova E.A. *Travyanaya rastitel'nost' basseyna reki Seym (v predelakh Kurskoy oblasti)* = Herbaceous vegetation of the Seim river basin (within the Kursk region). Bryansk: RIO BGU, 2010:351. (In Russ.)
20. Grigor'ev I.N., Solomeshch A.I., Alimbekova L.M., Onishchenko L.I. *Vlzhnye luga Respubliki Bashkortostan: sintaksonomiya i voprosy okhrany* = Wet meadows of the Republic of Bashkortostan: syntaxonomy and conservation issues. Ufa: Gilem, 2002:157. (In Russ.)
21. Yamalov S.M., Bayanov A.V. On two associations of true meadows in the North-East of the Republic of Bashkortostan. *Rastitel'nost' Rossii* = Vegetation of Russia. 2008;(13):82–92. (In Russ.)
22. Martynenko V.B., Yamalov S.M., Zhigunov O.Yu., Filinov A.A. *Rastitel'nost' gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika «Shul'gan-Tash»* = Vegetation of the state natural reserve "Shulgan-Tash". Ufa: Gilem, 2005:272. (In Russ.)
23. Borodulina V.P., Komarova A.F., Cherednichenko O.V. Overland meadows in the buffer zone of the Polistovsky Reserve (Pskov Region). *Raznoobrazie rast. Mira* = Diversity of the world vegetation. 2019;1(1):44–61. (In Russ.)
24. Chytrý M. *Vegetace České republiky 1. Travná a keříčková vegetace [Vegetation of the Czech Republic. 1. Grassland and heathland vegetation]*. Praha: Academia, 2007:526.
25. Chytrý M. *Vegetace České republiky 2. Ruderalní, plevelová, skalní a suťová vegetace [Vegetation of the Czech Republic 2. Ruderal, Weed, Rock and Scree vegetation]*. Praha: Academia, 2009:520.

26. Usmanova L.S., Golovanov Ya.M., Abramova L.M. Synanthropic vegetation of the *Artemisetaea vulgaris* class in the central part of the Bashkir Cis-Urals. *Nauch. vedomosti. Ser. Estestvennye nauki* = Scientific bulletin. Natural Sciences series. 2014;(3):9–19. (In Russ.)
27. Ermakov N.B. Prodrum of higher units of vegetation in Russia. *Sovremennoe sostoyanie osnovnykh kontseptsiy nauki o rastitel'nosti* = Current State of Basic Concepts in Vegetation Science. Ufa: Gilem, 2012:488. (In Russ.)
28. Chytrý M. *Vegetace České republiky. 3. Vodní a mokřadní vegetace [Vegetation of the Czech Republic 3. Aquatic and wetland vegetation]*. Praha: Academia, 2011:827.
29. Mucina L., Bültmann H., Dierßen K. [et al.]. Vegetation of Europe: hierarchical floristic classification system of vascular plant, bryophyte, lichen, and algal communities. *Applied Vegetation Science*. 2016;19:3–264.
30. van Dijk G. The status of semi-natural grasslands in Europe. *The conservation of lowland dry grassland birds in Europe: Proceedings of an International Seminar Held at the University of Reading*. 1991:15–35.
31. Znamenskiy S.R. Ecological structure of mesophytic meadow communities of Zaonezhie (Karelia). PhD abstract. Moscow, 2003:25. (In Russ.)
32. Rūsiņa S. Diagnostic species of mesophyllous and xerophyllous grassland plant communities in Latvia. *Latvijas Universitātes Raksti. Zemes Un Vides Zinātnes*. 2005;685:69–95.
33. Zelnik I., Čarni A. Plant species diversity and composition of wet grasslands in relation to environmental factors. *Biodiversity and Conservation*. 2013;22:2179.
34. Dengler J., Janišová M., Török P., Wellstein C. Biodiversity of Palearctic grasslands: a synthesis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2014;182:1–14.
35. Glushkov I., Lupachik V., Prishchepov A. [et al.]. Mapping abandoned land in Eastern Europe using satellite imagery of Landsat and Google Earth Engine. *Aerokosmicheskie metody i geoinformatsionnye tekhnologii v lesovedenii, lesnom khozyaystve i ekologii: doklady VII Vseros. konf. (g. Moskva, 22–24 aprelya 2019 g.)* = Aerospace methods and geoinformation technologies in forestry, forest management and ecology: proceedings of VII All-Russian. conf. (Moscow, 22–24 April, 2019). Moscow, 2019:35. (In Russ.)
36. Rocchini D., Hernández-Stefanoni J.L., He K.S. Advancing species diversity estimate by remotely sensed proxies: a conceptual review. *Ecological informatics*. 2015;25:22–28.
37. Neumann C., Itzerott S., Weiss G. [et al.]. Mapping multiple plant species abundance patterns – A multiobjective optimization procedure for combining reflectance spectroscopy and species ordination. *Ecological Informatics*. 2016;36:61–76.
38. Rapinel S., Mony C., Lecoq L. [et al.]. Evaluation of Sentinel-2 time-series for mapping floodplain grassland plant communities. *Remote sensing of environment*. 2019;223:115–129.
39. Xu D., Chen B., Shen B. [et al.]. The classification of grassland types based on object-based image analysis with multisource data. *Rangeland Ecology & Management*. 2019;72(2):318–326.
40. Bradter U., O'Connell J., Kunin W.E. [et al.]. Classifying grass-dominated habitats from remotely sensed data: the influence of spectral resolution, acquisition time and the vegetation classification system on accuracy and thematic resolution. *Science of The Total Environment*. 2020;711:134584.
41. Mirkin B.M., Naumova L.G. *Sovremennoe sostoyanie osnovnykh kontseptsiy nauki o rastitel'nosti* = Current State of Basic Concepts in Vegetation Science. Ufa: AN RB; Gilem, 2012:488. (In Russ.)
42. Reshetnikova N.M., Korol'kova E.O., Novikova T.A. *Sosudistye rasteniya zapovednika «Polistovskiy» (Annotirovannyi spisok vidov)* = Vascular Plants of the Polistovsky Reserve (Annotated List of Species). Izd-vo Komissii RAN po sokhraneniyu biologicheskogo raznoobraziya i IPEE RAN, 2006:97. (In Russ.)
43. Lavrenko E. M., Korchagina A. A. [ed.]. *Polevaya geobotanika. Metodicheskoe rukovodstvo* = Field geobotany. Methodological guidance. Moscow; Leningrad: Izd-vo AN SSSR, 1964;3:530. (In Russ.)
44. Braun-Blanquet J. *Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde. 3. Auflage*. Wien; New-York, 1964:865.
45. McCune B., Mefford M.J. *PC-ORD Multivariate Analysis of Ecological Data, Version 6. MjM Software Design*. Oregon: Gleneden Beach, 2011:28.
46. Tichý L., Chytrý M. Statistical determination of diagnostic species for site groups of unequal size. *Journal of Vegetation Science*. 2006;17:809–818.
47. Peck J.E. *Multivariate Analysis for Community Ecologists: Step-by-Step using PC-ORD. MjM Software Design*. Oregon: Gleneden Beach, 2010:162.
48. Jarolímek I. *Diagnostic, constant and dominant species of the higher vegetation units of Slovakia*. Bratislava: Veda, 2008:332.
49. Valachovič M. *Rastlinné spoločenstvá Slovenska. 3. Vegetácia mokradí*. Bratislava: Veda, 2001:435.
50. Hegedúšová Vantarová K. *Rastlinné spoločenstvá Slovenska. 5. Travinno-bylinná vegetácia*. Bratislava: Veda, 2014:581.
51. Grokhilina T.I., Khanina L.G. On computer processing of geobotanical descriptions by ecological scales. *Matematicheskoe modelirovanie v ekologii: materialy Chetvertoy nats. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem (18–22 maya 2015 g.)* = Mathematical modeling in ecology: proceedings of the Fourth National Research Conf. with international participation (18–22 May, 2015). Pushchino, 2015:63–64. (In Russ.)
52. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R. [et al.]. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*. 2013;342(6160):850–853.
53. Pettorelli N., Vik J.O., Mysterud A. [et al.]. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends in Ecology and Evolution*. 2005;20:503–510.

54. Richards J.A., Jia X. *Remote sensing digital image analysis. An introduction*. Berlin: Springer, 2006:439.
55. Wu C., Niu Z., Tang Q., Huang W. Estimating chlorophyll content from hyperspectral vegetation indices: Modeling and validation. *Agricultural and forest meteorology*. 2008;148(8-9):1230–1241.
56. Breiman L. Random forests. *Machine learning*. 2001;45(1):5–32.
57. Cherepanov S.K. *Sosudistye rasteniya Rossii i sopredel'nykh gosudarstv (v predelakh byvshego SSSR) = Vascular Plants of Russia and Neighboring Countries (within the former USSR)*. Saint-Petersburg: Mir i sem'ya, 1995:995. (In Russ.)
58. Jin S., Sader S.A. Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. *Remote sensing of Environment*. 2005;94(3):364–372.
59. Komarova A., Cherednichenko O., Borodulina V. [et al.]. Grassland communities within abandoned settlements in NW Russia: syntaxa and land use status. *Program and Abstracts 16th Eurasian Grassland Conference (EGC)*. Graz, Austria, 2019:26.
60. Deák B., Valkó O., Török P. [et al.]. Grassland fires in Hungary – Experiences of nature conservationists on the effects of fire on biodiversity. *Appl. Ecology and Environmental Research*. 2014;12(1):267–283.
61. Kutyna I., Młynkowiak E., Malinowska K. Structure and floristic diversity of the community *Calamagrostietum epigeji* Juraszek 1928 within different biotopes. *Folia Pomer. Univ. Technol. Stetin., Agric., Aliment., Pisc., Zootech.* 2016;325(37):47–64.
62. Feilhauer H., Thonfeld F., Faude U. [et al.]. Assessing floristic composition with multispectral sensors – A comparison based on monotemporal and multiseasonal field spectra. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2013;21:218–229.
63. Hüttich C., Gessner U., Herold M. [et al.]. On the suitability of MODIS time series metrics to map vegetation types in dry savanna ecosystems: A case study in the Kalahari of NE Namibia. *Remote sensing*. 2009;1(4): 620–643.

ХАРАКТЕРИСТИКА СИНТАКСОНОВ

Класс **PHRAGMITO-MAGNOCARICETEA**
Klika in Klika et Novák 1941

Класс объединяет осоковые, камышовые и прочие высокотравные сообщества пресных и солоноводных водоемов и водотоков Евразии [29]. В этот класс входят сообщества укорененных возвышающихся над водой растений берегов и прибрежных зон водоемов, сообщества болотистых лугов и травяных болот [27].

Союз **Magnocaricion elatae** Koch 1926

Исследованную нами растительность мы отнесли к союзу **Magnocaricion**, который объединяет преимущественно крупноосоковые сообщества береговой зоны. Иногда такие сообщества занимают неглубокие прибрежные части водоемов и формируются на олиготрофных и мезотрофных донных отложениях [27, 29]. В нашем случае этот союз представлен сообществами с доминированием вейника сероватого и осоки пузырчатой в локальных понижениях и в руслах временных водотоков.

Диагностические виды: *Carex acuta*, *Carex vesicaria*, *Calamagrostis canescens*.

Константные виды: *Galium palustre*, *Lysimachia vulgaris*, *Lythrum salicaria*.

Доминантные виды: *Calamagrostis canescens*, *Carex vesicaria*, *Lysimachia vulgaris*.

Средняя высота травяного яруса составляет 91 см (от 60 до 160 см). Среднее проективное покрытие травостоя – 88 %. Моховой ярус хорошо выражен, в большинстве описаний его покрытие составляло 10 %, однако в некоторых случаях проективное покрытие мхов достигало 50–80 %. Видовая насыщенность сосудистых растений от 14 до 39 видов на 100 м². Средняя видовая насыщенность сосудистых растений – 24 видов на 100 м².

По устному сообщению местных жителей на некоторых урочищах серовейниковые луга ранее косили.

Класс **ARTEMISIETEA VULGARIS** Lohmeyer et al. ex von Rochow 1951

Класс объединяет рудеральные сообщества высокорослых дву- и многолетников умеренного и субсредиземноморского поясов Евразии [27, 29].

Союз **Convolvulo arvensis-Agropyron repentis** Görs 1967

Исследованную нами растительность мы отнесли к союзу **Convolvulo arvensis-Agropyron repentis**. Она представлена антропогенными (субрудеральными) сообществами неморальной и суббореальной зон Европы [27, 29]. Сообщества этого союза относятся к ассоциации **Convolvulo arvensis-Elytrigietum repentis**, которая является одним из наиболее распространенных синтаксонов сорной растительности.

Диагностические виды: *Bromopsis inermis*, *Calamagrostis epigeios*, *Poa angustifolia*, *Elytrigia repens*, *Artemisia vulgaris*.

Константные виды: *Elytrigia repens*, *Artemisia vulgaris*.

Доминантные виды: *Elytrigia repens*, *Dactylis glomerata*, *Trifolium medium*, *Urtica dioica*, *Anthriscus sylvestris*, *Cirsium setosum*, *Calamagrostis epigeios*.

В большинстве фитоценозов преобладали *Elytrigia repens*, *Anthriscus sylvestris*, *Artemisia vulgaris*, *Urtica dioica* и *Cirsium setosum*. Сообщества образовывали плотные травостои, средняя высота которых составляла 119 см. Проективное покрытие достигало 98 %. Моховой ярус был представлен слабо, проективное покрытие не превышало 5 %. На многих площадках мхи не были обнаружены. Видовая насыщенность сосудистых растений от 15 до 53 видов на 100 м². Средняя видовая насыщенность сосудистых растений – 29 видов на 100 м².

Класс **EPILOBIETEA ANGUSTIFOLII** Tx. et Preisig ex von Rochow 1951

L. Mucina с соавторами [29] приводят следующее определение растительности класса **Epilobietea angustifolii**: высокотравные субрудеральные травяные сообщества многолетников лесных опушек и полей на нарушенных богатых почвах в умеренных и бореальных зонах Евразии.

Союз **Epilobion angustifolii** Oberd. 1957

Союз объединяет высокотравные субрудеральные сообщества лесных опушек и полей бореальной и неморальной зон Европы на кислых почвах [29]. Растительность этого союза на исследуемой территории была представлена маловидовыми наземнейниковыми сообществами.

Диагностические виды: *Calamagrostis epigeios*, *Chamaenerion angustifolium*, *Rubus idaeus*.

Доминантные виды: *Calamagrostis epigeios*, *Trifolium medium*, *Filipendula ulmaria*.

Подъярусы в травостое не выделяются, средняя высота травостоя – 91 см. Травостой сомкнутый, проективное покрытие – 94 %. Часто побеги вейника лежат во второй половине лета, закрывая еще больше другие виды. Видовая насыщенность сосудистых растений от 8 до 34 видов на 100 м². Средняя видовая насыщенность – 24 вида на 100 м².

Класс **MOLINIO-ARRHENATHERETEA**
Tx. 1937

Класс объединяет антропогенные луга умеренной зоны Западной Евразии на достаточно богатых незасоленных почвах на низких и средних высотах (редко – на больших высотах). Сообщества класса – преимущественно послелесные луга, образующиеся в результате сведения лесов с последующим сенокосным и пастбищным использованием [27, 29].

Союз **Filipendulion ulmariae** Segal ex Westhoff et Den Held 1969

Союз объединяет высокотравную лугово-опушечную растительность на влажных минеральных почвах умеренной зоны Европы [29]. Сообщества союза развиваются на периодически затопляемых богатых обычно с доминированием *Filipendula ulmaria* [27]. Союз имеет широкую экологическую амплитуду в разных частях ареала. По одним источникам [29] сообщества союза формируются на кислых почвах, по другим [27] – на насыщенных кальцием.

Диагностические виды: *Filipendula ulmaria*, *Geranium palustre*, *Geum rivale*, *Lythrum salicaria*, *Thalictrum lucidum*, *Valeriana officinalis*.

Доминантные виды: *Filipendula ulmaria*.

Облик сообщества определяет таволга вязолистная (*Filipendula ulmaria*). Средняя высота травяного яруса составляет 88 см (от 35 до 170 см). Среднее проективное покрытие травостоя – 94 %. Видовая насыщенность сосудистых растений от 32 до 56 видов на 100 м². Средняя видовая насыщенность сосудистых растений – 43 вида на 100 м².

Союз **Calthion palustris** Tx. 1937

L. Mucina с соавторами [29] к союзу *Calthion* относит богатые видами сообщества сенокосных лугов переменного увлажнения на минеральных почвах субокеанической Западной и субконтинентальной Центральной Европы. Наиболее сырые луга порядка *Molinietales* с ослабленным из-за переувлажнения участием мезофитных видов класса *Molinio-Arrhenatheretea* [27].

Диагностические виды: *Carex vulpina*, *Phalaroides arundinacea*, *Angelica sylvestris*, *Galium uliginosum*, *Ranunculus auricomus*.

Константные виды: *Filipendula ulmaria*, *Coccyanthe flos-cuculi*, *Deschampsia cespitosa*, *Festuca rubra*, *Lathyrus pratensis*, *Ranunculus acris*, *Alopecurus pratensis*, *Carex nigra*, *Juncus efusus*, *Rumex acetosa*, *Ranunculus repens*.

Средняя высота травяного яруса составляет 94 см. Среднее проективное покрытие травостоя – 97 %. Видовая насыщенность сосудистых растений от 42 до 76 видов на 100 м². Средняя видовая насыщенность сосудистых растений – 53 вида на 100 м².

Союз **Molinion caeruleae** Koch 1926

Союз объединяет влажные сенокосные луга на минеральных и торфянистых почвах Западной и Центральной Европы [29].

Диагностические виды: *Potentilla erecta*, *Succisa pratensis*, *Carex panicea*, *Molinia caerulea*, *Carex pallescens*, *Selinum carvifolia*, *Festuca rubra*, *Coccyanthe flos-cuculi*, *Nardus stricta*, *Briza media*, *Centaurea jacea*, *Ranunculus acris*, *Rumex acetosa*.

Константные виды: *Alopecurus pratensis*, *Carex nigra*, *Cirsium palustre*, *Festuca pratensis*, *Galium uliginosum*, *Lathyrus pratensis*, *Leontodon autumnalis*, *Ranunculus auricomus*, *Stellaria graminea*, *Trifolium pratense*, *Veronica chamaedrys*, *Lysimachia vulgaris*, *Achillea millefolium*, *Anthoxanthum odoratum*, *Deschampsia cespitosa*, *Plantago lanceolata*, *Poa pratensis*.

Средняя высота травяного яруса – 105 см. В некоторых случаях можно было выделить подъярусы. Высота нижнего подъяруса – от 20 до 50 см, верхнего – от 80 до 160 см. Проективное покрытие травостоя – 95 %. Моховой ярус хорошо выражен, в некоторых случаях проективное покрытие мхов достигло 10–15 %. Видовая насыщенность сосудистых растений от 27 до 54 видов на 100 м². Средняя видовая насыщенность сосудистых растений – 39 видов на 100 м².

На изучаемой территории луга союза использовались как сенокосы в прошлом.

Союз **Cynosurion cristati** Tx. 1947

Союз объединяет низкотравные луга лесной зоны европейской части России при сенокосно-пастбищном использовании на хорошо дренированных бедных слабокислых почвах [27, 29].

Диагностические виды: *Agrostis tenuis*, *Carex lachenalii*, *Carex pallescens*, *Leontodon autumnalis*, *Luzula multiflora*, *Phleum pratense*, *Veronica serpyllifolia*, *Plantago major*, *Cynosurus cristatus*, *Taraxacum officinale*, *Amorpha repens*.

Anthoxanthum odoratum, *Briza media*, *Festuca rubra*, *Plantago lanceolata*, *Prunella vulgaris*.

Константные виды: *Achillea millefolium*, *Alchemilla vulgaris*, *Campanula patula*, *Leucanthemum vulgare*, *Potentilla erecta*, *Ranunculus acris*, *Trifolium pratense*, *Veronica chamaedrys*, *Taraxacum officinale*, *Amoria repens*, *Anthoxanthum odoratum*, *Briza media*, *Festuca rubra*, *Plantago lanceolata*, *Prunella vulgaris*.

Сообщества представляют собой богатые видами злаково-разнотравные луга. Средняя высота травяного яруса – 77 см. В некоторых случаях можно было выделить подъярусы. Высота нижнего подъяруса – от 10 до 80 см, верхнего – от 30 до 130 см. Среднее проективное покрытие травостоя – 93 %. Видовая насыщенность сосудистых растений от 29 до 65 видов на 100 м². Средняя видовая насыщенность сосудистых растений – 43 вида на 100 м².

На исследуемой территории луга союза использовались до 2018 года как сенокосы.

Союз *Arrhenatherion elatioris* Luquet 1926

Союз объединяет косимые луга на богатой минеральной почве [29].

Диагностические виды: *Phleum pratense*, *Festuca pratensis*, *Festuca rubra*, *Poa pratensis*, *Trifolium pratense*, *Campanula patula*, *Dactylis glomerata*, *Galium mollugo*, *Leontodon hispidus*, *Leucanthemum vulgare*, *Plantago lanceolata*.

Константные виды: *Achillea millefolium*, *Alchemilla vulgaris*, *Amoria repens*, *Anthoxanthum odoratum*, *Lathyrus pratensis*, *Ranunculus acris*, *Rumex acetosa*, *Taraxacum officinale*, *Veronica chamaedrys*, *Festuca pratensis*, *Festuca rubra*, *Poa pratensis*, *Trifolium pratense*, *Campanula patula*, *Dactylis glomerata*, *Galium mollugo*, *Leontodon hispidus*, *Leucanthemum vulgare*, *Plantago lanceolata*.

Сообщества союза представляют собой в большинстве случаев низкотравные разнотравно-злаковые луга, но встречаются и высокотравные. Эти сообщества не имеют выраженных доминантов. Средняя высота травяного яруса – 64 см. В некоторых случаях можно бы-

ло выделить подъярусы. Высота нижнего подъяруса – от 20 до 70 см, верхнего – от 40 до 150 см. Среднее проективное покрытие травостоя – 90 %. Моховой ярус был выражен слабо, проективное покрытие мхов не превышало 5 %. Видовая насыщенность сосудистых растений от 29 до 54 видов на 100 м². Средняя видовая насыщенность сосудистых растений – 40 видов на 100 м².

На изучаемой территории луга союза использовались как сенокосы в прошлом.

Союз *Potentillion anserinae* Тх. 1947

Союз объединяет сообщества влажных лугов пастбищного использования на богатых почвах в умеренной зоне [27, 29]. Сообщества этого союза формируются в местах с переменным увлажнением с преобладанием низкорослых влаголюбивых видов [19, 27]. Такие низкотравные гигрофитные сообщества с высоким участием вегетативно подвижных наземностолонных эксплерентов, таких как *Agrostis stolonifera* и *Potentilla anserina*, широко распространены в Евразии. Растительность этого союза на исследуемой территории представлена сообществами с доминированием ситника развесистого во влажных замкнутых понижениях на участках, непригодных для сенокосения.

Константные виды: *Agrostis stolonifera*, *Potentilla anserina*, *Ranunculus repens*, *Taraxacum officinale*.

Доминантные виды: *Juncus filiformis*, *Carex vesicaria*, *Ranunculus repens*, *Potentilla anserina*.

Облик сообщества определяет диагностический вид-доминант ситник развесистый (*Juncus effusus*). Средняя высота травяного яруса – 94 см. Проективное покрытие травостоя – 87 %. Моховой ярус хорошо выражен, в большинстве описаний его покрытие составляло 5 %, однако в некоторых случаях проективное покрытие мхов достигало 40–80 %. Видовая насыщенность сосудистых растений от 19 до 37 видов на 100 м². Средняя видовая насыщенность сосудистых растений – 29 видов на 100 м².

ТОЧНОСТЬ И ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ПРИЗНАКИ ВЫДЕЛЕНИЯ СИНТАКСОНОВ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

I. Точность выделения отдельных союзов и классов

Таблица 1

Table 1

Точность выделения отдельных классов

Accuracy of identifying individual classes

		Значения на картосхеме					0.6
	Класс	1	2	3	4	Сумма	РА
Результаты валидации	<i>Phragmito-Magnocaricetea</i>	10	12	5	1	28	0,4
	<i>Molinio-Arrhenatheretea</i>		897	42	9	948	0,9
	<i>Artemisietea vulgaris</i>		118	311	15	444	0,7
	<i>Epilobietea angustifolii</i>		32	24	45	101	0,4
	Сумма	10	1059	382	70	1521	
0,826	UA	1	0,85	0,81	0,64		0,8

Таблица 2

Table 2

Точность выделения отдельных союзов

Accuracy of identifying individual unions

		Значения на картосхеме										0.79
	Союз	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Сумма	РА
Результаты валидации	<i>Magno-Caricion elatae</i>	19					2	1	4	2	28	0,68
	<i>Potentillion anserinae</i>		13								13	1
	<i>Cynosurion cristati</i>		4	386					4		394	0,98
	<i>Filipendulion ulmariae</i>				9		4	4	1	2	20	0,45
	<i>Calthion palustris</i>	1		1		231		5	11	1	250	0,92
	<i>Molinion caeruleae</i>						42	2	8	9	61	0,69
	<i>Arrhenatherion elatioris</i>	1		1	7	7		179	15		210	0,85
	<i>Convolvulo arvensis-Agropyrion repentis</i>	3		4		8	3	34	380	12	444	0,86
	<i>Epilobion angustifolii</i>						9	2	21	69	101	0,68
	Сумма	24	17	392	16	246	60	227	444	95	1521	
0,79	UA	0,79	0,76	0,98	0,56	0,94	0,7	0,8	0,86	0,73		0,87

Примечание. В табл. 1, 2 представлены стандартные ошибки User Accuracy (commission error, ложная классификация) – точность выделенного класса/союза на карте, и Producer Accuracy (omission error, пропуски) – качество выделения каждого класса/союза в применении к реальности (Чандра, Гош, 2006).

II. Результаты применения функции VarImpPlot для наборов предикторов на обучающей выборке

Из 243 предикторов, в число которых входили стандартные индексы, значения отражения в спектральных каналах, а также их нормализованные попарные разности, наиболее значимыми для картографирования классов оказались индексы Brightness из триады ин-

дексов Кауфа – Томаса (Tasseled Cup), полученные по снимкам Sentinel-2 за 3 июня и 29 мая 2018 года, а также значения отражения в восьмом спектральном канале снимка за 29 мая. Однако обширный набор индексов и значений каналов (рис. 1,а) также является значимым, поскольку их исключение из модели приводит к снижению точности на 4–5 позиций.

Рис. 1. Результаты применения функции VarImpPlot:
а – для классов; б – для союзов

Fig. 1. Results of applying VarImpPlot function:
а – for classes; б – for unions

Для дешифрирования союзов наиболее важными предикторами были нормализованная разность между значениями 8 канала снимков за 3 июня и 9 мая 2018 года, а также Brightness по снимку за 29 мая 2018 года.

III. Результаты анализа распределения признаков для классов (с. 27–46)

Обозначения классов: 1 – *Phragmito-Magnocaricetea*; 2 – *Molinio-Arrhenatheretea*; 3 – *Artemisietea vulgaris*; 4 – *Epilobietea angustifolii*

Основные комментарии:

– на ранних майских снимках яркость (Brightness) *Phragmito-Magnocaricetea* достоверно ниже яркости остальных классов, для которых характерно отсутствие достоверных различий. Начиная с конца мая – начала июня этот показатель также достоверно выше остальных классов для *Epilobietea angustifolii*. В целом в течение периода активной вегетации (июнь – начало августа) яркость рудеральных сообществ (*Artemisietea vulgaris* и *Epilobietea angustifolii*) выше, чем для остальных двух классов;

– аналогичный феномен – высокая яркость рудеральных сообществ – наблюдается также для индекса Greenness, а также для 7 и 8 спектральных каналов. Описанная изменчивость в течение вегетационного сезона также сохраняется. При этом у сообществ класса *Phragmito-Magnocaricetea* значения индекса Greenness достоверно ниже остальных сообществ;

– во втором спектральном канале на июньских снимках отражение сообществ *Epilobietea angustifolii* достоверно отличается от остальных в меньшую сторону. На августовских снимках такого различия не наблюдается;

– индекс LAV (Specific Leaf Area Vegetation Index) оказался в целом мало информативен, поскольку достоверных различий между классами по нему не наблюдалось. Единственное исключение – на снимке за 3 июня 2018 года для сообществ *Epilobietea angustifolii* этот индекс варьирует очень слабо и дает достоверное отличие. На снимке за 18 июня 2019 года относительно высокие значения имеют рудеральные сообщества, но отличие недостоверное. Возможно, если подобрать модификации этого индекса, на июньских снимках он может быть полезен;

– индексы, касающиеся влажности (их использовалось три: Tasseled Cup Wetness, Moisture и NDWI), дают интересную картину, которая отчасти требует пояснения дополнительными исследованиями. Экологический смысл индексов несколько различается: NDWI характеризует в первую очередь water content, в то время как Moisture – степень precipitation, т.е. увлажнения местообитания за счет осадков, а Wetness – влажность местообитания; последний в большой степени topography sensitive. При этом Moisture и Wetness скоррелированы между собой – как по литературным данным (Jin, Sader, 2005), так и в нашем случае. Из характерных черт этих индексов – только более высокие значения для рудеральных сообществ в мае 2018 года (в 2019 году такого эффекта не наблюдается), а также чуть более низкие (но недостоверно) значения для *Phragmito-Magnocaricetea* в мае 2018 года и достоверно более низкие – в июне 2019 года. В остальные периоды значения этих индексов в разных сообществах достоверно не отличаются. Низкие значения для *Phragmito-Magnocaricetea* и высокие для рудеральных сообществ – результат контринтуитивный, и для его объяснения были бы полезны данные за другие периоды. Поскольку результат неустойчив, возможно, он связан с условиями конкретного года. Также может влиять необходимость коррекции с учетом положения в рельефе (т.е., например, воз-

можно для *Phragmito-Magnocaricetea*, расположенных в локальных понижениях, на самом деле выше индексы в другие периоды, кроме мая и июня разных лет, а в эти месяцы отличие недостоверно – т.е. в мае и июне влажность одинаковая, а позже сообщества *Phragmito-Magnocaricetea* выглядят как более влажные);

– интересно, что в этот же период (май/июнь в разные года) у *Phragmito-Magnocaricetea* меньше Greenness («зеленость»), Chlorophyll absorption, а также достоверно меньше продуктивность (NDVI), чем у всех остальных сообществ. Вообще по всем индексам продуктивность рудеральных сообществ в мае и июне достоверно выше, чем для первых двух классов, в начале июня особенно высока в *Epilobietea angustifolii*. К августу *Phragmito-Magnocaricetea* догоняет рудеральные сообщества по продуктивности, а продуктивность *Molinio-Arrhenatheretea* наоборот снижается и становится самой низкой. Между рудеральными классами лидерство по продуктивности переходит от одного сообщества к другому и зависит, по-видимому, не только от сезона, но и от условий конкретного момента;

– индекс NDWI (water content) снижается в ряду *Phragmito-Magnocaricetea* – *Molinio-Arrhenatheretea* – *Artemisietea vulgaris* – *Epilobietea angustifolii* за исключением граничных периодов вегетационного сезона – начала мая и августа-сентября, когда в лидеры по этому признаку выходит *Molinio-Arrhenatheretea* (впрочем, как правило, различия недостаточно достоверны). Зато в начале сезона (особенно в 2018 году) NDWI для рудеральных сообществ достоверно ниже, чем для *Phragmito-Magnocaricetea* и *Molinio-Arrhenatheretea* – возможно, это связано с наличием ветоши. С другой стороны, в 2019 году для *Epilobietea angustifolii* это различие недостоверно. Возможно, ветошь (преимущественно вейник наземный) была уничтожена в результате массовых травяных палов, которые случились ранней весной 2019 года в урочище Плавница, где наиболее распространены эти сообщества. В конце сентября 2019 года класс *Epilobietea angustifolii* уже снова характеризуется наименьшими значениями NDWI;

– также для многих сообществ оказались значимы предельные значения нормализованных разностей (например, хорошим диагностическим признаком являются высокие значения для пар снимков июнь-август, низкие август-сентябрь). Различие непосредственно в спектральных каналах же, напротив, для большинства дат недостоверно. Отдельные исключения наблюдаются для предельных случаев (напри-

мер, второй канал – синяя часть спектра, или ранние майские снимки; однако рудеральные сообщества вместе иногда достоверно отличаются и в традиционных спектральных диапазонах в сезон вегетации, но это скорее исключение). В целом это объясняет, почему различие

между сообществами на снимках в стандартных синтезах не выявляется при визуальном анализе (проще говоря, почему разницу между сообществами на снимках не видно или видно только на уровне рудеральные/нерудеральные сообщества).

Таблица 3

Table 3

Наиболее информативные (дающие достоверное отличие) признаки для каждого класса

The most informative (giving a reliable difference) signs for each class

Класс	Выпадающе низкое значение предиктора	Выпадающе высокое значение предиктора	Дифференцирующее, но не выпадающее значение
1 – <i>Phragmito-Magnocaricetea</i>	Moi_190618 S190618B06 S190618B08, B8A S180509B07, B08 S180509B8A Bri_180529, 26 Bri_180509 Bri_180603 Gre_180529 Gre_180603 Gre_190908	B08_88048603 B8A_88048603 B08_88040529	
2 – <i>Molinio-Arrhenatheretea</i>	NDVI180804 B05_99289618 S180804B06, B08		S190618B08, B8A Bri_180603 Gre_180529 Gre_180603
3 – <i>Artemisietea vulgaris</i>		Bri_180529 Bri_180603	S180526B04 NDWI180603 RE2_180529 NRE_180603
4 – <i>Epilobietea angustifolii</i>	S180526B04 S180526B02, B03 S180529B02 S180529B04 NDWI180603 B05_96189519 S180529B12 S180603B04	NDVI180529 NDVI180603 RE2_180529 RE2_180603 NRE_180603 LAV_180603	

Обозначения в таблице строятся по следующему принципу: префикс S означает исходный спектральный канал, B – то, что предиктор является нормализованной разницей между каналами разных снимков (в префикс включен номер канала; в таблице выделены розовым). Остальные предикторы обозначают спектральные индексы. Дата снимка обозначается как ггммдд, за исключением разниц каналов –

в этом случае даты обозначены как ггммд в порядке уменьшаемое-вычитаемое. Оранжевым цветом обозначены осенние снимки.

Отметим, что в таблице приведены только случаи, когда сообщество абсолютно дифференцировано от остальных сообществ. Однако чаще всего сообщества по одному предиктору дифференцируются попарно в разных сочетаниях.

Bri_180509

Bri_180526

Bri_180529

Bri_180603

Bri_180804

Bri_180824

S180529B07

S180529B08

S180529B11

S180529B12

S180529B8A

S180603B02

Bri_180908

Bri_190519

Bri_190531

Bri_190618

Bri_190928

CA180509

S180603B03

S180603B04

S180603B05

S180603B06

S180603B07

S180603B08

CA190519

CA190531

CA190618

CA190928

Gre_180509

Gre_180526

S180804B05

S180804B06

S180804B07

S180804B08

S180804B11

S180804B12

CA180526

CA180529

CA180603

CA180804

CA180824

CA180908

S180603B11

S180603B12

S180603B8A

S180804B02

S180804B03

S180804B04

Gre_180529

Gre_180603

Gre_180804

Gre_180824

Gre_190519

Gre_190531

S180804B8A

S180824B02

S180824B03

S180824B04

S180824B05

S180824B06

Gre_190618

Gre_190908

Gre_190928

LAV_180509

LAV_180529

LAV_180603

S180824B07

S180824B08

S180824B11

S180824B12

S180824B8A

S180908B02

LAV_180804

LAV_180824

LAV_180908

LAV_190519

LAV_190531

LAV_190618

S180908B03

S180908B04

S180908B05

S180908B06

S180908B07

S180908B08

LAV_190928

Moi_180509

Moi_180526

Moi_180529

Moi_180804

Moi_180824

S180908B11

S180908B12

S180908B8A

S190519B02

S190519B03

S190519B04

Moi_180908

Moi_190519

Moi_190531

Moi_190618

Moi_190928

Moi180603

S190519B05

S190519B06

S190519B07

S190519B08

S190519B11

S190519B12

NDVI180509

NDVI180526

NDVI180529

NDVI180603

NDVI180804

NDVI180824

S190519B8A

S190531B02

S190531B03

S190531B04

S190531B05

S190531B06

NDVI180908

NDVI190519

NDVI190531

NDVI190618

NDVI190928

NDVI180509

S190531B07

S190531B08

S190531B11

S190531B12

S190531B8A

S190618B02

NDWI180526

NDWI180529

NDWI180603

NDWI180804

NDWI180824

NDWI180908

S190618B03

S190618B04

S190618B05

S190618B06

S190618B07

S190618B08

NDW/190519

NDW/190531

NDW/190618

NDW/190928

NRE_180509

NRE_180526

S190618B11

S190618B12

S190618B8A

S190928B02

S190928B03

S190928B04

NRE_180529

NRE_180603

NRE_180804

NRE_180824

NRE_180908

NRE_190519

S190928B05

S190928B06

S190928B07

S190928B08

S190928B11

S190928B12

NRE_190531

NRE_190618

NRE_190928

RE2_180509

RE2_180526

RE2_180529

S190928B8A

Wet_180509

Wet_180526

Wet_180529

Wet_180804

Wet_180824

RE2_180603

RE2_180804

RE2_180824

RE2_180908

RE2_190519

RE2_190531

Wet_180908

Wet_190519

Wet_190531

Wet_190618

Wet_190928

Wet_S2018

RE2_190618

RE2_190928

S180509B02

S180509B03

S180509B04

S180509B05

S180509B06

B02_86038509

B02_88040529

B02_88048603

B02_89088804

B02_96189519

B02_99289618

B05_86038509

S180509B07

S180509B08

S180509B11

S180509B12

S180509B8A

S180526B02

S180526B03

B05_88040529

B05_88048603

B05_89088804

B05_96189519

B05_99289618

B08_86038509

B08_88040529

S180526B04

S180526B05

S180526B06

S180526B07

S180526B08

S180526B11

B08_88048603

B08_89088804

B08_96189519

B08_99289618

B8A_86038509

B8A_88040529

S180526B12

S180526B8A

S180529B02

S180529B03

S180529B04

S180529B05

B8A_88048603

B8A_89088804

B8A_96189519

B8A_99289618

S180529B06

IV. Результаты анализа распределения признаков для союзов (стр. 49–66)

Обозначения союзов: 1 – *Magnocaricion elatae* (класс *Phragmito-Magnocaricetea*); 2 – *Potentillion anserinae*; 3 – *Cynosurion cristati*; 4 – *Filipendulion ulmariae*; 5 – *Calthion palustris*; 6 – *Molinion caeruleae*; 7 – *Arrhenatherion elatioris* (союзы 2–7 – класс *Molinio-Arrhenatheretea*); 8 – *Convolvulo arvensis-Agropyron repentis* (класс *Artemisietea vulgaris*); 9 – *Epilobion angustifolii* (класс *Epilobietea angustifolii*).

Примечание. Отличия союзов 1, 8 и 9 между собой аналогичны отличиям между классами, обсуждаемыми в предыдущем разделе. Поэтому в основном в данном разделе рассмотрены отличительные особенности союзов 2–7, относящихся к классу *Molinio-Arrhenatheretea*. Однако на графиках приведены и союзы, относящиеся к отдельным классам, чтобы обеспечить возможность сравнения.

Основные комментарии:

- яркость (Brightness) наиболее информативна в начале и в конце сезона. Интересно, что в начале и в конце сезона лидерами являются разные сообщества: в начале мая – *Cynosurion cristati*, в конце сентября – *Potentillion anserinae*. В мае 2019 года достоверно отличающейся низкой яркостью обладают также *Arrhenatherion elatioris* и в меньшей степени – *Calthion palustris*;

- индекс содержания хлорофилла не очень информативен, однако на весенних снимках 2018 года союзы *Potentillion anserinae* и *Molinion caeruleae* достоверно отличаются (вверх) по этому показателю от всех остальных союзов этого класса и близки к значениям, характерным для рудеральных сообществ. Затем различия размываются (правда, значения индекса для *Potentillion anserinae* падают быстрее, чем для *Molinion caeruleae*), а к августу *Potentillion anserinae* наоборот достоверно отличается от остальных сообществ вниз. Интересно, что в 2019 году описанное верно только для *Potentillion anserinae*. Аналогичные закономерности характерны для индекса «зелености» (Greenness) и в меньшей степени – для индекса площади листовой поверхности;

- индекс NearRedEdge, представляющий собой соотношение ближнего инфракрасного и красного канала (так называемую «красную границу растительности») в начале сезона даёт для *Molinion caeruleae* и *Arrhenatherion elatioris* значения, близкие к рудеральным сообществам (классы *Artemisietea vulgaris* и *Epilobietea angustifolii*). В августе значения этого индекса резко снижаются для всех сооб-

ществ, особенно для *Potentillion anserinae* – и меньше всего для *Filipendulion ulmariae*. Аналогичная картина наблюдается для индекса RedEdge2;

- влажность местообитания на весенних снимках малоинформативна. А вот на осенних снимках в 2018 году выделяются (влажность местообитания ниже остальных союзов) не только отличающийся по многим признакам *Potentillion anserinae*, но и *Cynosurion cristati* и *Calthion palustris*, а в 2019 году – *Filipendulion ulmariae*. При этом влажность в сообществах *Potentillion anserinae* весь 2019 год держалась на относительно высоких значениях, так что именно для этого союза в 2019 году дифференцирующим стал не август, а май;

- содержание влаги (NDWI) более информативно в конце сезона, чем в начале. NDWI за август и сентябрь 2018 года также входят в число наиболее значимых предикторов для классификации. В то же время для этого признака картина существенно отличается по годам: в 2019 году он значительно менее информативен даже в конце сезона;

- в течение сезона активной вегетации продуктивность (NDVI) сообществ *Potentillion anserinae* и *Cynosurion cristati* достоверно ниже продуктивности остальных союзов (*Filipendulion ulmariae*, *Calthion palustris*, *Molinion caeruleae*, *Arrhenatherion elatioris*). Для *Molinion caeruleae* значения продуктивности в начале лета максимальны и близки к рудеральным сообществам. Далее быстрее всего снижается продуктивность *Calthion palustris*, и в конце сезона ситуация меняется на противоположную: впереди оказываются *Potentillion anserinae* и *Cynosurion cristati*;

- как и в случае с классами, информативной оказалась попарная нормализованная разность между отдельными каналами разновременных снимков, особенно относящихся к разным частям сезона (начало мая/июнь и июнь/август). Особенно значима разность между восьмыми и вторыми спектральными каналами за разные даты.

Видно, что в пределах класса *Molinio-Arrhenatheretea* представлены очень разнообразные по спектральным свойствам сообщества. При классификации на уровне классов все они оказываются в одной группе, спектральные признаки которой «размываются» и редко характеризуются достоверными отличиями (см. предыдущий раздел). Это объясняет феномен более высокой точности классификации на уровне союзов, чем на уровне классов.

Таблица 4

Table 4

Наиболее информативные (дающие достоверное отличие) признаки для каждого союза
в пределах класса ***Molinio-Arrhenatheretea***

The most informative (giving a reliable difference) signs for each union
within the class ***Molinio-Arrhenatheretea***

Союз	Выпадающе низкое значение предиктора	Выпадающе высокое значение предиктора	Дифференцирующее, но не выпадающее значение
2 – <i>Potentillion anserinae</i>	CA180804, 0824 Moi_180824 NRE_180804 B8A_89088804	Bri_180804, 0824, Bri_180908 CA180509 CA190519 NDWI180804, 0824	
3 – <i>Cynosurion cristati</i>	CA180603, CA190531, CA190618 S190531B08 RE2_180526 B05_86038509	S180603B02 S180509B02, 03 Bri_180509 S180526B02	S180804B11 S180824B12 Re2_180804 B08_89088804 B8A_89088804
4 – <i>Filipendulion ulmariae</i>	Moi_190928 S190928B07, B8A B08_99289618 B8A_99289618	S190618B06	S180529B08 S180804B8A LAV_180804 Moi_180824
5 – <i>Calthion palustris</i>	S180529B11 S180526B11 NRE_180908	S180824B05 NDWI180908	S180804B8A S190519B05
6 – <i>Molinion caeruleae</i>	S180603B04 S180908B02, 04 NDWI180603 S180509B04 B02_96189519 S180509B12	S180529B08 S180603B08 S190928B05 Bri_180603 CA180509 CA180908 CA180804 Gre_180509, 0526 RE2_180526 RE2_180908	Moi_180804 B08_96189519 B8A_96189519
7 – <i>Arrhenatherion elatioris</i>	Bri_1905019 S180509B06, 07 S180804B04, B11 S190519B03, 05 S190531B02, 03, 04 S190928B11, 12 S180509B8A	Moi_180804 Wet_180804 Wet_180529 B08_88040529	

Обозначения в таблице строятся по следующему принципу: префикс S означает исходный спектральный канал, B – то, что предиктор является нормализованной разницей между каналами разных снимков (в префикс включен номер канала; в таблице выделены розовым). Остальные предикторы обозначают спектральные индексы. Дата снимка обозначается как ггммдд, за исключением разниц каналов – в этом случае даты обозначены как ггммд в порядке уменьшаемое-вычитаемое. Оранжевым цветом обозначены осенние снимки.

Отметим, что в таблице приведены только случаи, когда сообщество абсолютно дифференцировано от всех остальных сообществ. Однако чаще всего сообщества по одному предиктору дифференцируются попарно в разных сочетаниях.

Если сравнить между собой таблицы достоверных признаков для классов и союзов, видно, что осенние снимки и разности в отдельных каналах имеют заметно большее значение для дифференциации отдельных союзов, чем классов.

S180824B05

S180824B06

S180824B07

S180824B08

S180824B11

S180824B12

S180824B8A

LAV_180603

LAV_180804

LAV_180824

LAV_180908

LAV_190519

LAV_190531

LAV_190618

S180908B02

S180908B03

S180908B04

S180908B05

S180908B06

S180908B07

S180908B08

B02_88048603

B02_89088804

B02_96189519

B02_99289618

B05_86038509

B05_88040529

B05_88048603

S180509B11

S180509B12

S180509B8A

S180526B02

S180526B03

S180526B04

S180526B05

B05_89088804

B05_96189519

B05_99289618

B08_86038509

B08_88040529

B08_88048603

B08_89088804

S180526B06

S180526B07

S180526B08

S180526B11

S180526B12

S180526B8A

S180529B02

B08_96189519

B08_99289618

B8A_86038509

B8A_88040529

B8A_88048603

B8A_89088804

B8A_96189519

S180529B03

S180529B04

S180529B05

S180529B06

S180529B07

S180529B08

S180529B11

B8A_99289618

S180529B06