

Идентификация участков массового роста борщевика Сосновского с помощью спектральных индексов по данным Sentinel-2

© 2019. Е. В. Товстик¹, к. б. н., с. н. с., доцент,
Т. А. Адамович¹, к. г. н., доцент,
Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
¹Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
²Институт биологии Коми НЦ УрО РАН,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: tovstik2006@inbox.ru, ttjnadamvich@rambler.ru

В работе описана возможность использования спутниковых снимков среднего пространственного разрешения с космического аппарата Sentinel-2 для идентификации участков массового роста борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.). Для дешифрирования космических снимков использовали вегетационные индексы NDVI и ClGreen. Расчётные индексы позволили выделить на снимках типы растительности, представляющих значительную часть растительных сообществ Кировской области (лиственные и хвойные породы, луговая растительность), а также моносообщества борщевика Сосновского. Применённый в работе подход к дешифрированию космических снимков показал, что вегетационные индексы ClGreen и NDVI можно использовать для обнаружения и картирования пространственного распределения борщевика Сосновского. Наилучший результат в случае индекса NDVI достигается при использовании весенних снимков (май), так как в этот период идёт активный рост борщевика Сосновского. Индекс хлорофилла ClGreen наиболее информативен при дешифрировании космоснимков, полученных в период цветения борщевика. На основе значений спектральных индексов по данным Sentinel-2 были построены карты-схемы распространения борщевика Сосновского на территории Фалёнского района Кировской области.

Ключевые слова: инвазивные растения, *Heracleum sosnowskyi* Manden., Sentinel-2, дистанционное зондирование Земли, вегетационные индексы, разностный вегетационный индекс NDVI, относительный индекс хлорофилла ClGreen, хлорофилл.

Identification of sites of mass growth of *Heracleum sosnowskyi* Manden. using spectral indices according to Sentinel-2 images

© 2019. E. V. Tovstik¹ ORCID: 0000-0003-1861-6076
T. A. Adamovich¹ ORCID: 0000-0002-8684-927X
T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047
¹Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
²Institute of Biology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Komi Republic, Russia, 167982,
e-mail: tovstik2006@inbox.ru, ttjnadamvich@rambler.ru

The paper describes the possibility of using satellite images of medium spatial resolution from the Sentinel-2 spacecraft to identify areas of mass growth of the Sosnovsky hogweed. Vegetation indices NDVI and ClGreen were used to interpret space images. The calculated indices made it possible to identify in the photographs the types of vegetation that represent a significant part of the plant communities of the Kirov region (deciduous and coniferous species, meadow vegetation), as well as the mono-community of the Sosnovsky hogweed. The approach to the interpretation of satellite images used in the work has shown that the vegetative indices ClGreen and NDVI can be used to detect and map the spatial distribution of the Sosnovsky hogweed. The best result in the case of the NDVI index is achieved by using spring shots (May), since during this period there is an active growth of the Sosnovsky hogweed. The index of chlorophyll ClGreen is the most informative one for interpretation of satellite images obtained during hogweed flowering. Based on the values of spectral indices, according to Sentinel-2, maps of the distribution of the Sosnovsky hogweed on the territory of the Falyonsky District of the Kirov Region were constructed.

Keywords: invasive plants, *Heracleum sosnowskyi* Manden, Sentinel-2, earth remote sensing, vegetative indexes, Normalized Difference Vegetation Index, Green Chlorophyll Index, chlorophyll.

С каждым годом борщевик Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden) расширяет свою биогеографию [1–5]. Только на территории России с 2011 по 2017 г. произошло его вторжение в 18 регионах [6]. Наиболее остро складывается ситуация вблизи центров его бывшего преднамеренного культивирования, в том числе на территории Кировской области [7].

После утраты статуса сельскохозяйственной культуры и внесения борщевика Сосновского в Отраслевой классификатор сорных растений Российской Федерации, началась активная разработка мер по борьбе с этим сорняком. В Кировской области в 2013 г. распоряжением Правительства области для изучения проблем борьбы с распространением борщевика Сосновского была создана рабочая группа, которая определяла необходимость разработки областной программы для организации борьбы с борщевиком и проведения с этой целью мониторинга распространения борщевика Сосновского. Для более точного обследования территории области предложено использовать космическую съёмку (данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ)) [8].

В настоящее время данные ДЗЗ широко используют для крупномасштабного анализа роста растительности, в том числе инвазивных видов [9–14].

Несмотря на ряд проблем, обусловленных одинаковыми спектральными коэффициентами отражения растительности, их классификацию на снимках проводят посредством определения фенологических характеристик растительности на основе временных рядов спектральных переменных спутниковых данных, а также расчёта различных вегетационных индексов [15–17]. Известно, что расчёт индексов базируется на двух наиболее стабильных и независимых от прочих факторов участках кривой спектральной отражательной способности растений. На красную зону спектра (0,62–0,75 мкм) приходится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом, а на ближнюю инфракрасную зону (0,75–1,30 мкм) – максимальное отражение энергии клеточной структурой листа. В связи с этим высокий уровень фотосинтетической активности, как правило, связанный с большой биомассой растительности, проявляется в низких значениях коэффициента отражения в красной зоне спектра и высоких – в ближней инфракрасной. Отношение значений этих показателей позволяет чётко отделять растительность от прочих природных объектов [18–19].

Кроме этого, стадия пика цветения растений может быть легко распознана на снимках, так как цветение растений может напрямую изменять отражательную способность на некоторых длинах волн [20].

Для контроля зон произрастания борщевика Сосновского возможность использования данных ДЗЗ определяется его ранним началом роста весной, быстрым формированием плотного навеса, а также цветением с формированием крупных белых соцветий [21].

Цель работы – использование спектральных индексов NDVI и ClGreen для мониторинга участков массового роста борщевика Сосновского.

Объекты и методы

Мониторинговые исследования участков массового роста борщевика Сосновского проводили на территории Фалёнского района Кировской области. Исследуемая территория входит в состав подзоны южной тайги европейской части северо-востока России, характеризующейся умеренно континентальным типом климата.

Для идентификации участков, занятых борщевиком Сосновского, использовали данные ДЗЗ с космического аппарата Sentinel-2 (Европейское космическое агентство). Данный спутник оснащён мультиспектральным прибором (MSI), позволяющим вести съёмку в 13-и спектральных каналах, охватывающим спектральную область (VNIR / SWIR) от видимого и ближнего инфракрасного до коротковолнового инфракрасного диапазонов [22–23]. Возможность использования данных ДЗЗ с космического аппарата Sentinel-2 для изучения растительности определяется наличием 3-х спектральных каналов на «красной границе», которые очень чувствительны к наличию хлорофилла в растениях.

Поскольку временные ряды NDVI для разных видов растительности в течение межвегетационного периода не обеспечивают чёткого фенологического разделения, поэтому в исследовании применяли изображения, полученные за вегетационный период с мая по октябрь [24]. В работе использовали доступные снимки исследуемой территории с пространственным разрешением 10 м: весна 25.05.2017, 17.05.2018, 22.05.2018; лето 13.08.2017, 23.08.2017, 1.07.2018, 31.07.2018; осень 2.09.2017, 12.10.2017, 24.09.2018.

Расчёт вегетационных индексов проводили с использованием четырёх спектральных

каналов (2, 3, 4 и 8) с пространственным разрешением 10 м. Использовали нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Данный безразмерный индекс описывает разницу между ближней инфракрасной (NIR) и красной (RED) частями электромагнитного спектра (диапазоны 0,72–1,10 и 0,58–0,68 мкм соответственно) [25]. Положительные значения данного индекса указывают на зелёную поверхность с растительностью, при этом наибольшие значения коррелируют с наибольшей зелёной биомассой. Отрицательные значения NDVI указывают на поверхность без растительного покрова. Индекс NDVI рассчитывали по формуле 1:

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

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра (канал 8); RED – отражение в красной области спектра (канал 4) [26].

Наряду с индексом NDVI, в работе использовали относительный индекс хлорофилла ClGreen (Green Chlorophyll Index), являющийся показателем фотосинтетической активности растительного покрова [27, 28]. Наибольшие значения индекса ClGreen коррелируют с наибольшим содержанием хлорофилла в листьях растений. Индекс ClGreen рассчитывали по формуле 2:

$$ClGreen = \frac{NIR}{GREEN} - 1, \quad (2)$$

где GREEN – отражение в зелёной области спектра; NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра.

Временные ряды NDVI и ClGreen строили для 4-х типов растительности, представляющих значительную часть растительных сообществ Кировской области: лиственные и хвойные породы, луговая растительность и моносообщества борщевика Сосновского.

Методика картирования участков массового роста борщевика Сосновского на основе использования спектральных вегетационных индексов включала в себя следующие этапы:

- подбор космических снимков на территорию объекта исследования и их предварительную обработку;
- анализ фактических данных по произошедшим изменениям, предварительный выбор индексов;
- расчёт спектральных индексов и выбор из них наиболее оптимальных;

– картирование участков массового роста борщевика Сосновского на основе расчётных индексов.

Результаты и обсуждение

Известно, что в течение вегетационного периода растения проходят определённые фенологические фазы развития. Происходящие при этом изменения отражаются на сезонной динамике их вегетационных индексов. По результатам проведённых исследований, расчётные значения индекса NDVI для 4-х классов исследуемой растительности были ниже в осенние (октябрь), чем в весенние (май) и летние (август) месяцы (рис. 1 а). Независимо от типа классифицируемой растительности, средние значения индекса NDVI в начале мая, были ниже, по сравнению со значениями индекса в июле (рис. 1 б).

Аналогичную картину наблюдали и в случае с индексом хлорофилла ClGreen, значения которого независимо от типа классифицируемой растительности в летние месяцы (июль, август) были выше, чем в весенние (май) (рис. 2 а, б).

Следует отметить близкие значения индекса NDVI для всех типов классифицируемой растительности в конце мая 2017 г. и их разброс в аналогичный период 2018 г. Данный факт, по-нашему мнению, может быть связан с погодными условиями (рис. 3 а, б) [29]. Несмотря на то, что погода в весенние месяцы (апрель и май) 2018 г. была теплее, чем в аналогичный период 2017 г., в связи с большим количеством осадков средняя высота снежного покрова на исследуемой территории в мае 2018 г. составила 6,5 см, тогда как в 2017 г. снежного покрова в мае уже не было. Возможно, наличие снежного покрова на исследуемой территории в мае 2018 г. привело к задержке роста луговой растительности и, соответственно, снижению значений индекса NDVI в конце мая 2018 г. по сравнению с 2017 г.

Следует отметить, что как в 2017 г., так и в 2018 г. значения индекса NDVI для классифицируемой растительности коррелировали со средними значениями температуры воздуха.

Проведение анализа временных рядов индекса хлорофилла ClGreen для борщевика Сосновского также позволило идентифицировать участки его массового роста в период с конца июля по сентябрь включительно. Средние значения индекса ClGreen для борщевика с конца июля по конец августа были значительно ниже значений, рассчитанных для луговой расти-

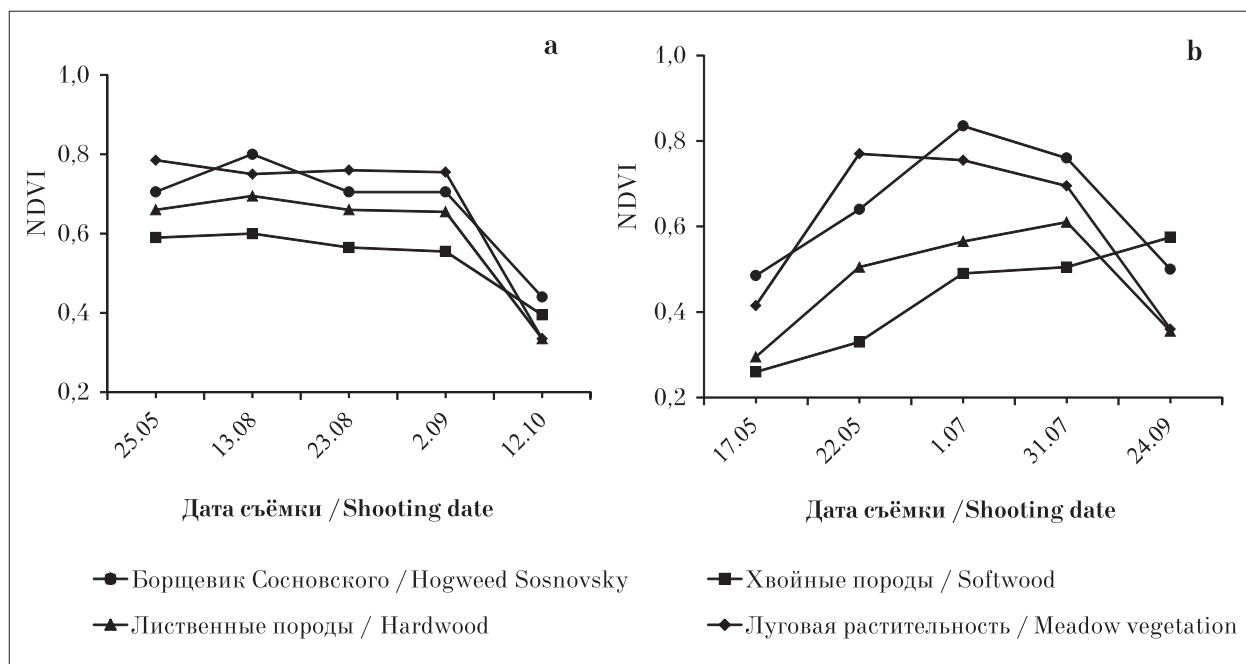


Рис. 1. Кривые динамики индекса NDVI для исследуемых классов растительности в 2017 г. (а) и 2018 г. (б)
 Fig. 1. Dynamics curves of the NDVI index for the studied vegetation classes in 2017 (a) and 2018 (b)

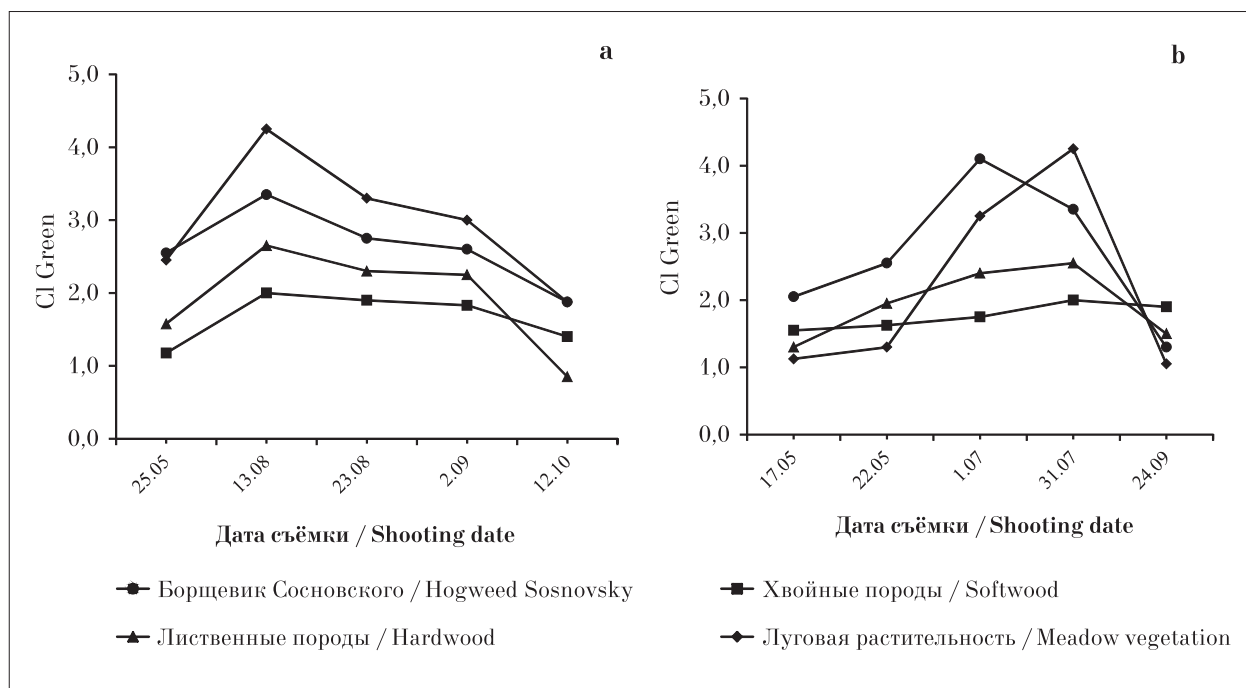


Рис. 2. Кривые динамики индекса ClGreen для исследуемых классов растительности в 2017 г. (а) и 2018 г. (б)
 Fig. 2. Dynamics curves of the ClGreen index for the studied vegetation classes in 2017 (a) and 2018 (b)

тельности (рис. 4 а, б, см. цветную вкладку). В сентябре отмечали противоположную картину: средние значения ClGreen для борщевика были выше, чем для луговой растительности (рис. 4 с, d, см. цветную вкладку).

Известно, что суммарная энергия солнечного излучения, поглощаемая листьями растений, напрямую связана с количеством в них хлорофилла. По мере накопления хлорофилла в ходе вегетативного развития растений

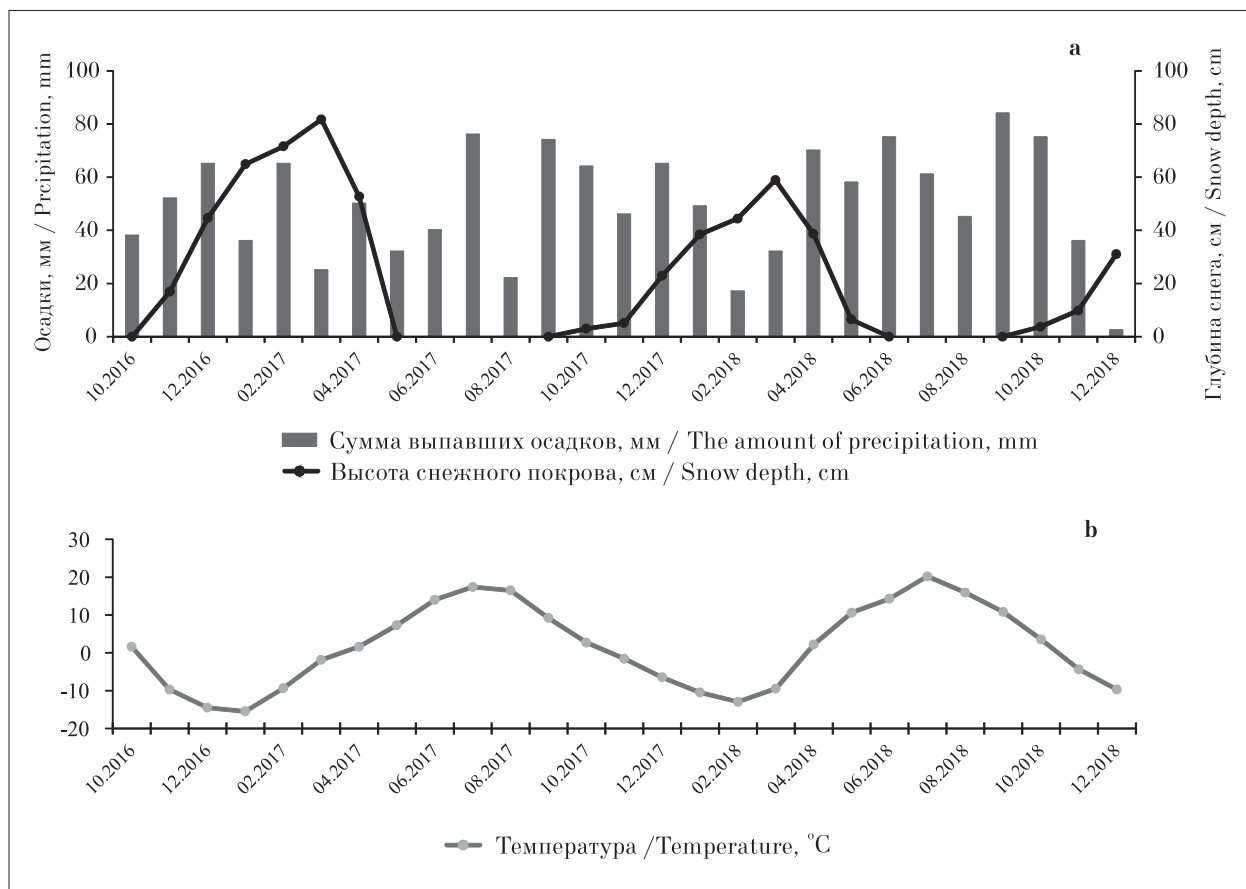


Рис. 3. Сумма выпавших осадков, высота снежного покрова по месяцам (а), среднемесячная температура воздуха (б) на исследуемой территории
Fig. 3. The sum of precipitations, height of snow cover on months (a), average monthly air temperature (b) in the explored territory

и увеличения их биомассы происходит понижение яркости растений в видимой части спектра и напротив её увеличение в инфракрасной части спектра. В осенние месяцы в результате разрушения хлорофилла наблюдается обратная картина. В нашем случае особенно отчётливо данную зависимость для борщевика, по сравнению с лиственными породами и луговой растительностью, прослеживали на снимках, полученных в сентябре.

Известно, что борщевик Сосновского после перезимовки начинает расти сразу после схода снега. Таким образом, с начала мая до конца июня – начала июля наблюдается активный набор биомассы борщевиком. Данную зависимость отчётливо прослеживали на снимках за 2018 г., на которых отмечали резкое увеличение средних значений индекса NDVI за короткий промежуток времени с 17 по 22 мая 2018 г. (рис. 1 б). Несмотря на то, что данная зависимость наблюдалась не только для борщевика Сосновского, но и для всех типов классифицируемой растительности, средние значения индекса NDVI в начале мая для

борщевика Сосновского были выше, чем для прочей растительности (рис. 5, см. цветную вкладку).

Таким образом, особенности быстрого роста борщевика Сосновского на начальных стадиях онтогенеза позволяют идентифицировать участки его массового роста на снимках, полученных в мае.

Основываясь на том, что цветение борщевика Сосновского происходит с конца июня и/или начала июля до середины августа, проводили анализ временных рядов NDVI за этот период. В результате было установлено, что в период цветения борщевика Сосновского (июль–начало августа) – средние значения индекса NDVI для него достигали максимума (0,76–0,84), тогда как для прочей растительности в этот период они были ниже (0,69–0,76).

Следует отметить, что расчётные значения индекса NDVI и индекса хлорофилла ClGreen для борщевика Сосновского, в отличие от других классов растительности, по всем датам съёмки коррелировали между собой ($r = 0,92$).

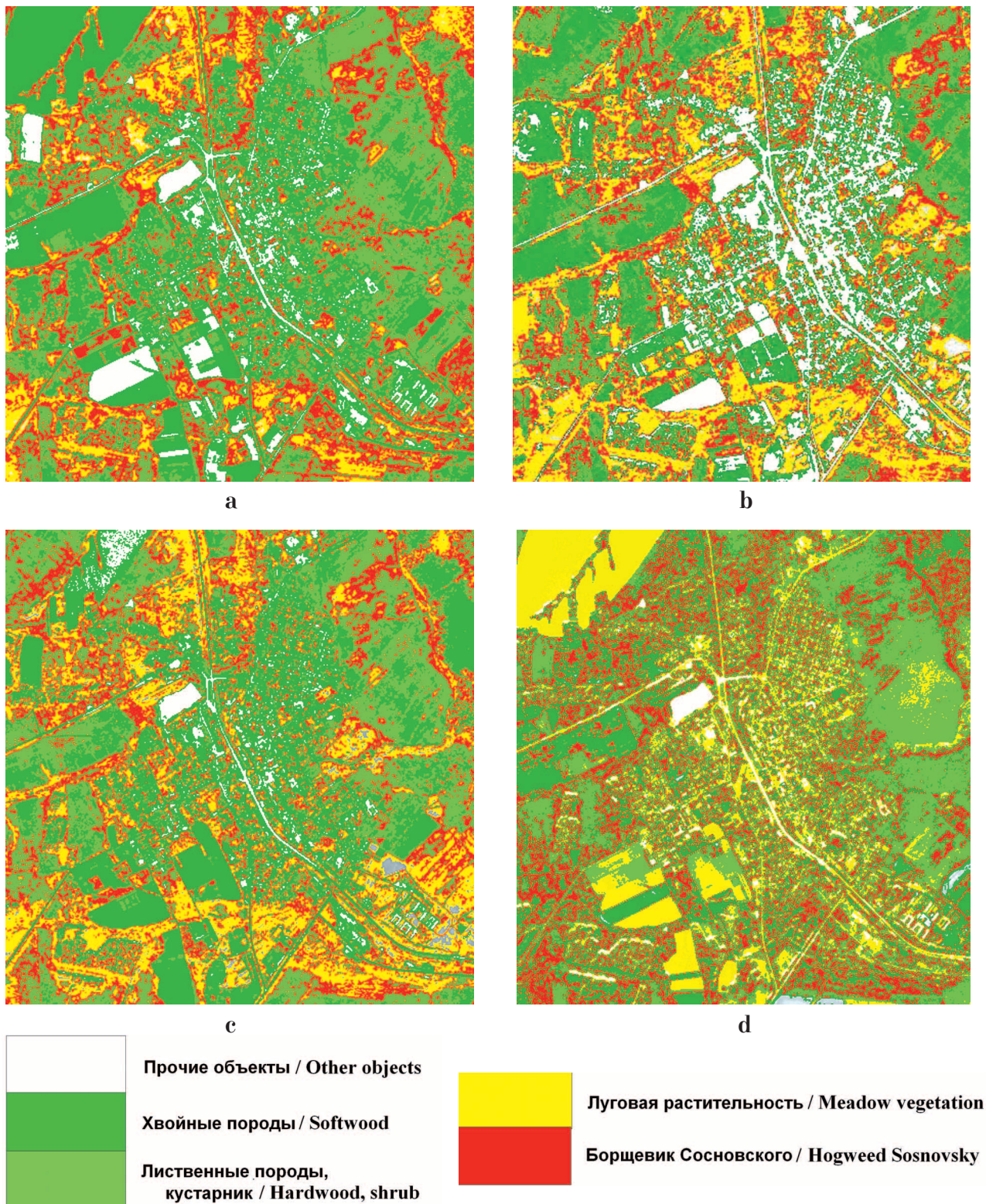


Рис. 4. Изменение пространственного распределения индекса ClGreen в конце июля (а) и августа (б), в начале (в) и конце сентября (д) для исследуемых классов растительности
Fig. 4. Changes in the spatial distribution of the ClGreen index at the end of July (a) and August (b), at the beginning (c) and end of September (d) for the vegetation classes studied

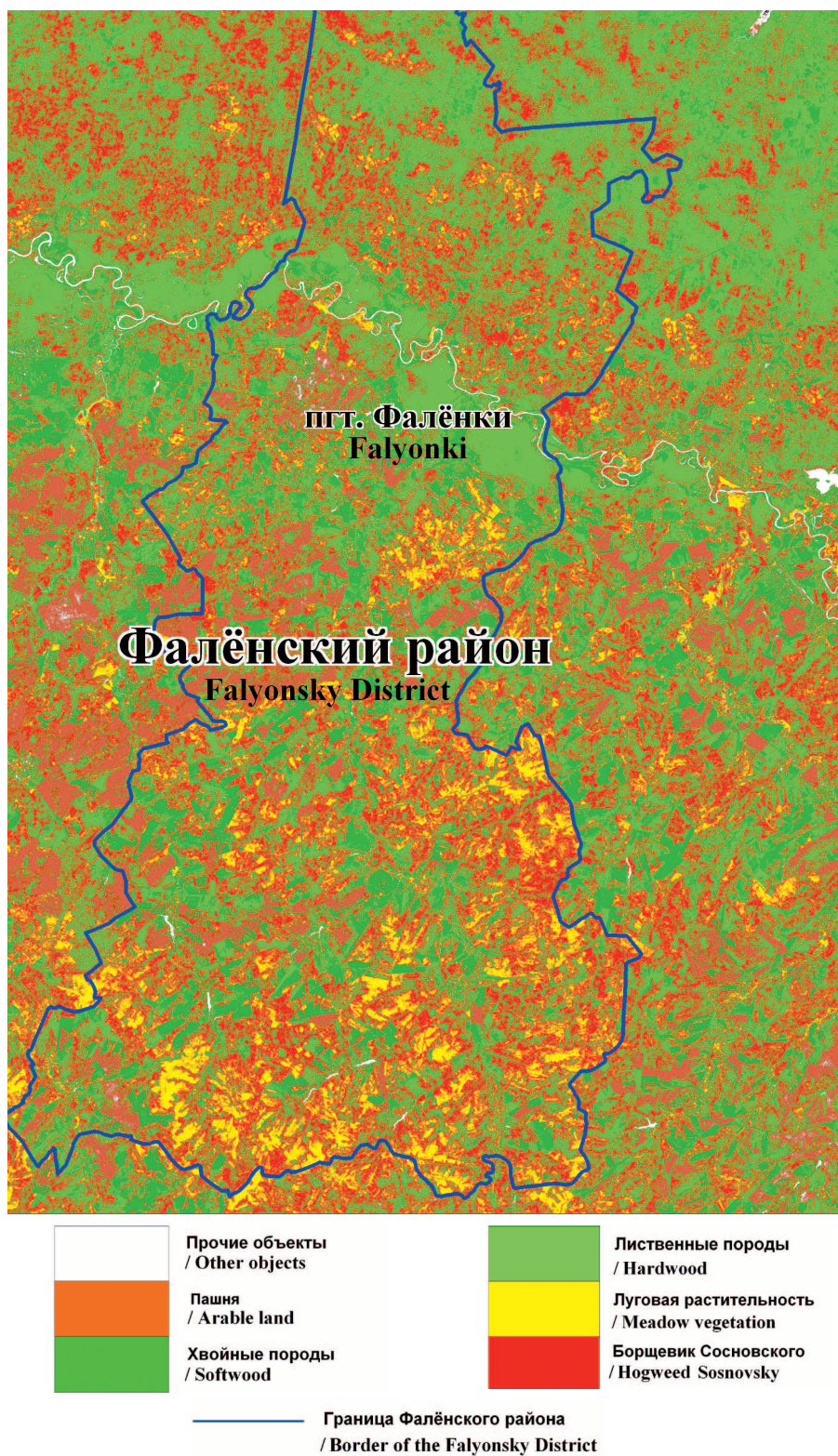


Рис. 5. Карта-схема пространственного распределения индекса NDVI на территории Фалёнского района (снимок от 22 мая 2018 г.)
Fig. 5. Map of the spatial distribution of the NDVI index on the territory of the Falyonsky District (photo dated May 22, 2018)

Заклучение

Таким образом, в результате исследований было проведено дешифрирование серии космических снимков с аппарата Sentinel-2 за период 2017–2018 гг. территории Фалёнского района Кировской области. По результатам обработки космоснимков были рассчитаны нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI и индекс хлорофилла CIGreen. По средним значениям вегетационных индексов для 4-х типов растительных сообществ (луговая растительность, хвойные и лиственные породы, моносообщества борщевика Сосновского) построены кривые динамики. На основе расчётных спектральных индексов NDVI и CIGreen удалось идентифицировать участки массового роста борщевика Сосновского.

Наиболее информативными для мониторинга борщевика Сосновского явились космоснимки за май и июль-август, когда происходит активный рост борщевика Сосновского и его цветение соответственно. В мае и летний период расчётные значения вегетационных индексов для борщевика Сосновского коррелируют между собой и, по сравнению с другими типами растительных сообществ, принимают наибольшие значения.

На основании полученных в ходе работы данных были построены карты-схемы пространственного распределения индекса NDVI и содержания хлорофилла по индексу CIGreen, на которых выявлены участки произрастания борщевика Сосновского.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых учёных – кандидатов наук (МК-2880.2018.5).

References

1. Soltysiak J., Brej T., Tomczyk M. Invasion of the Sosnowsky hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) in Siechnice commune (South-western Poland) and prospects of its eradication // Scientific Papers of Wrocław University of Life Sciences – Biology and Animal Breeding. 2015. V. 78. No. 610. P. 73–86.

2. Chadin I., Dalke I., Zakhozhiy I., Malyshev R., Madi E., Kuzivanova O., Kirillov D., Elsakov V. Distribution of the invasive plant species *Heracleum sosnowskyi* Manden. in the Komi Republic (Russia) // PhytoKeys. 2017. No. 77. P. 71–80. doi: 10.3897/phytokeys.77.11186

3. Stojanovic V., Petrovic S., Kovacevic J., Stojanovic D., Bjedov I. *Heracleum pinewood* Manden. (Apiaceae): A new invasive species in the flora of Serbia // Glasnik Spumar-

skog faculteta. 2017. No. 116. P. 215–220. doi: 10.2298/GSF1716215S

4. Baranova O.G., Brelgina E.N. Invasive plant species in three cities of the Udmurt Republic // Rossiyskiy zhurnal biologicheskikh invaziy. 2015. No. 4. P. 14–21 (in Russian).

5. Gusev A.P. Landscape-ecological analysis of the spread of alien transforming species in natural and anthropogenic landscapes (southeast of Belarus) // Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii. 2017. No. 2. P. 47–51 (in Russian).

6. Dalke I.V., Chadin I.F., Zakhozhiy I.G. Control of Sosnowskyi's Hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) invasion on the territory of the Russian Federation // Russian Journal of Biological Invasions. 2018. V. 9. No. 4. P. 311–344. doi: 10.1134/S2075111718040045

7. Ozerova N.A., Krivosheina M.G. Patterns of secondary range formation for *Heracleum sosnowskyi* and *H. mantegazzianum* on the territory of Russia // Russian Journal of Biological Invasions. 2018. V. 9. No. 2. P. 155–162. doi: 10.1134/S2075111718020091

8. Information on the preparation of measures to combat the spread and liquidation of the poisonous plant “Borshevik Sosnovsky” in the territory of the Kirov region [Internet resource] <http://www.zsko.ru/> (Accessed: 17.05.2019).

9. Ryzhikov D.M. Method of processing multispectral satellite data for solving the problem of monitoring the habitats of the Sosnovsky Hogweed // Informatsionno-upravlyayushchie sistemy. 2017. No. 6. P. 43–51 (in Russian). doi: 10.15217/issn1684-8853.2017.6.43

10. Tovstik E.V., Adamovich T.A., Rutman V.V., Kantor G.Ya., Ashikhmina T.Ya. Identification of the thickets of *Heracleum sosnowskyi* using Earth remote sensing data // Theoretical and Applied Ecology. 2018. No. 2. P. 35–37 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2018-2-035-037

11. Rocchini D., Andreo V., Förster M., Garzon-Lopez X.C., Gutierrez A.P., Gillespie T.W., Hauffe H.C., He K.S., Kleinschmit B., Mairota P., Marcantonio M., Metz M., Nagendra H., Pareeth S., Ponti L., Ricotta C., Rizzoli A., Schaab G., Zebisch M., Zorer R., Neteler M. Potential of remote sensing to predict species invasions: A modelling perspective // Progress in Physical Geography: Earth and Environment. 2015. V. 39. No. 3. P. 283–309. doi: 10.1177/0309133315574659

12. Adamovich T.A., Domnina E.A., Timonov A.S., Rutman V.V., Ashikhmina T.Ya. Methodological techniques for identifying plant communities based on Earth remote sensing data and field research // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 2. P. 39–43 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-039-043

13. Zinchenko V.E., Lokhmanova O.I., Kalinichenko V.P., Glukhov A.I., Povkh V.I., Shlyakhova L.A. Space monitoring of agricultural land in the south of Russia // Issledovanie Zemli iz kosmosa. 2013. No. 3. P. 33–44 (in Russian). doi: 10.7868/S0205961413030068

14. Yang C. A high-resolution airborne four-camera imaging system for agricultural remote sensing // *Comput Electron Agric.* 2012. V. 88. P. 13–24. doi: 10.1016/j.compag.2012.07.003
15. Yan E., Wang G., Lin H., Xia C., Sun H. Phenology-based classification of vegetation cover types in Northeast China using MODIS NDVI and EVI time series // *International Journal of Remote Sensing.* 2015. V. 36 (2). P. 489–512. doi: 10.1080/01431161.2014.999167
16. Miklashevich T.S., Bartalev S.A. Method for determining the phenological characteristics of vegetation based on the time series of satellite data // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa.* 2016. V. 13. No. 1. P. 9–24 (in Russian). doi: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-9-24
17. Volkov A., Parinova T. Thematic interpretation of the Northern Dvina River floodplain meadow ecosystem using remote sensing // *BIO Web of Conferences.* 2018. V. 11. No. 00045. P. 1–3. doi: 10.1051/bioconf/20181100045
18. Tuddenham W.G., Le Marshall J.F. The interpretation of NDVI data and the potential use of a differential technique for monitoring time sequential changes in vegetation cover // *Proceedings of the 2nd Australian Conference on Agricultural Meteorology.* Brisbane, Australia, 1996. P. 57–61.
19. Cridland S., Burnside D., Smith R. The NDVI – use in rangeland management // *In Proceeding of the 5th International Rangelands Congress.* Salt Lake City, Utah, 1995. P. 105–106.
20. Kogan F.N. Vegetation index for areal analysis of crop conditions / Preprints, Proc. 18th conf. of Agricultural and Forest Meteorology, West Lafayette, IN, Amer. Meteor. Soc., 1987. P. 103–107.
21. Ge S., Everitt J., Carruthers R., Gong, P., Anderso G. Hyperspectral characteristics of canopy components and structure for phenological assessment of an invasive weed // *Environ. Monit. Assess.* 2006. V. 120. P. 109–126. doi: 10.1007/s10661-005-9052-1
22. Drusch M., Del Bello U., Carlier S., Colin O., Fernandez V., Gascon F., Hoersch B., Isola C., Laberinti P., Martimort P., Meygret A., Spoto F., Sy O., Marchese F., Bargellini P. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services // *Remote Sensing of Environment.* 2012. V. 120. P. 25–36. doi: 10.1016/j.rse.2011.11.026
23. Vrieling A., Meroni M., Darvishzadeh R., Skidmore A.K., Wang T., Zurita-Milla R., Oosterbeek K., O'Connor B., Paganini M. Vegetation phenology from Sentinel-2 and field cameras for a Dutch barrier island // *Remote Sensing of Environment.* 2018. V. 215. P. 51–529. doi: 10.1016/j.rse.2018.03.014
24. Senay G.B., Elliott R.L. Combining AVHRR-NDVI and landuse data to describe temporal and spatial dynamics of vegetation // *Forest Ecology and Management.* 2000. V. 128. P. 83–91. doi: 10.1016/S0378-1127(99)00275-3
25. Earth observatory. Measuring Vegetation. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) [Internet resource] <https://earthobservatory.nasa.gov/> (Accessed: 15.04.2019).
26. Myneni R.B., Hall F.G., Sellers P.J., Marshak A.L. The interpretation of spectral vegetation indexes // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 1995. V. 33. P. 481–486.
27. Curran P.J., Durgan J.L., Gholz H.L. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine // *Tree Physiol.* 1990. V. 7. P. 33–48. doi: 10.1093/treephys/7.1-2-3-4.33
28. Moran J.A., Mitchell A.K., Goodmanson G., Stockburger K.A. Differentiation among effects of nitrogen fertilization treatments on conifer seedlings by foliar reflectance: a comparison of methods // *Tree Physiol.* 2000. V. 20. P. 1113–1120. doi: 10.1093/treephys/20.16.1113
29. Weather in Falenki [Internet resource] <https://rp5.ru/> (Accessed: 19.05.2019).