

**Мониторинг распространения *Heracleum sosnowskyi*
на урбанизированных территориях по данным дистанционного
зондирования Земли**

© 2023. Т. Я. Ашихмина^{1,2}, д. т. н., профессор, г. н. с., зав. лабораторией,
В. В. Рутман¹, м. н. с., Т. А. Адамович¹, к. г. н., доцент,
Е. В. Товстик¹, к. б. н., доцент, с. н. с.,
¹Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения
Российской академии наук,
167982, Россия, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 28,
e-mail: usr08619@vyatsu.ru

В статье рассматривается проблема распространения и возможности мониторинга борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) на отдельных территориях городской среды с помощью данных дистанционного зондирования Земли. В качестве исходной спутниковой информации использовались снимки с аппарата Sentinel-2 с разрешением 10 м. По спутниковым данным осуществляли распознавание, отслеживание, анализ и картирование участков распространения борщевика Сосновского. Выбор участков массового роста борщевика Сосновского для мониторинга проводился в ходе предварительных полевых исследований на примере территории г. Кирова. В основе результатов мониторинговых исследований лежали различия в отражающей способности между борщевиком и другими объектами окружающей среды. Обработку данных спутниковой информации проводили в программе QGIS-3.26. По результатам работы были получены карты, на которых визуализировались участки массового роста борщевика Сосновского. Встроенные инструменты программы позволили вычислить площади распространения исследуемого инвазивного вида на отдельных территориальных участках г. Кирова. Идентифицированные зоны были представлены участками сплошного зарастания и распределения его небольшими группами. В работе описана методика, позволяющая рассчитать изменения площадей участков сплошного зарастания борщевиком Сосновского на исследуемой территории. Методика позволяет установить периоды максимального прироста борщевика, определять тенденции изменения площадей участков его сплошного зарастания.

Результаты работы наглядно демонстрируют эффективность сочетания методов дистанционного зондирования Земли и алгоритмов обработки космоснимков в мониторинге распространения борщевика Сосновского.

Ключевые слова: *Heracleum sosnowskyi*, инвазивные виды, мониторинг, дистанционное зондирование Земли, Sentinel-2, алгоритм обработки, площадь зарастания.

**Monitoring the distribution of *Heracleum sosnowskyi*
in urban areas based on Earth remote sensing data**

© 2023. T. Ya. Ashikhmina^{1,2} ORCID: 0000-0003-4919-0047, V. V. Rutman¹ ORCID: 0000-0002-9025-3487,
T. A. Adamovich¹ ORCID: 0000-0002-8684-927X, E. V. Tovstik¹ ORCID: 0000-0003-1861-6076,
¹Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
²Institute of Biology of Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
28, Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, Russia, 167982,
e-mail: usr08619@vyatsu.ru

The article deals with the problem of distribution and the possibility of monitoring Sosnowsky's hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) in certain areas of the urban environment using Earth remote sensing data. The Sentinel-2 images with a resolution of 10 m were used as the initial satellite information. Identifying, tracking, analysis and mapping the distribution areas of Sosnowsky's hogweed were carried out using satellite data. The choice of mass growing areas of Sosnowsky's hogweed for monitoring was carried out during the preliminary field studies of the urban territory

of Kirov. The monitoring studies were based on differences in the reflectivity between the hogweed and other environmental objects. Satellite data processing was carried out using the QGIS-3.26 program. Based on the results of the work, maps were obtained, on which areas of mass growth of Sosnowsky's hogweed were visualized. The built-in tools of the program allowed calculating the area of distribution of the studied invasive species in certain areas of Kirov. The identified areas were represented by plots of continuous overgrowth and its distribution in small groups. The paper describes a technique that makes it possible to calculate changes in the areas of plots of continuous overgrowth of Sosnowsky's hogweed in the study area. The technique enables to identify periods of maximum growth of hogweed, to determine the trends in the area of its continuous overgrowth.

The results of the work demonstrate the effectiveness of a combination of Earth remote sensing methods and satellite image processing algorithms in monitoring the distribution of Sosnowsky's hogweed.

Keywords: *Heracleum sosnowskyi*, invasive species, monitoring, Earth remote sensing, Sentinel-2, processing algorithm, overgrowth area.

Инвазия растений, оказывая трансформирующее воздействие на биоразнообразие и устойчивость естественных экосистем, выступает серьёзной эколого-экономической проблемой [1–3]. Она заслуживает особого внимания, так как в современных условиях изменяющегося климата высока вероятность распространения нежелательных видов [4].

В настоящее время в некоторых странах на законодательном уровне принимаются меры по недопущению интродукции определённых видов растений [5], разрабатываются способы борьбы с ними [6].

Важным инструментом противодействия биологическим инвазиям являются методы мониторинга, с помощью которых предоставляется возможность определять приоритетные участки распространения инвазивных видов растений, оценить их обилие [7]. Учитывая сложность искоренения чужеродных видов, особенно актуально проводить мониторинг на ранней стадии инвазии.

Своевременному обнаружению появления инвазивных видов помогают новые технологии. Среди них ДНК-экспертиза, рецепторные (хеморецепция), аэрокосмические технологии и др. [8].

Наряду с полевыми обследованиями и лабораторным анализом, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) является значимым инструментом мониторинга растительных видов. Широкий спектр изображений от различных оптических датчиков (мультиспектральные, гиперспектральные) позволяет получать полезную информацию для картографирования их пространственного распределения [9–12]. Наряду с этим, данные космической съёмки являются объективными, они охватывают значительные площади, имеют относительно низкую стоимость по сравнению с другими методами [13–16].

Изучение спектрального отклика растений на основе данных, собранных с помощью ДЗЗ, имеет большой потенциал для идентификации

инвазивных растений [17]. Однако точность их определения зависит от многих факторов, в том числе метода обработки данных, типа растительности. Например, надёжность распознавания борщевика Сосновского на фоне других травянистых и древесных растений по снимкам WorldView-3 методом неконтролируемой классификации программой MultiSpec в работе [18] достигала 83%. Аналогичная точность определения борщевика Сосновского по спектральным признакам отмечена в работах и других авторов. При этом более высокой точности позволяет достичь метод классификации на основе нейронных сетей [19].

Значительные успехи в повышении точности обнаружения борщевика Сосновского на снимках достигнуты при комбинировании методов ДЗЗ и машинного обучения. Так, неконтролируемая классификация программой **RGB-изображения на основе контролируемого метода расчёта средней длины волны** в отдельных каналах спектра отражения борщевика Сосновского [20]. Известны алгоритмы обучения на наборе данных, состоящем из 12 каналов спутниковых снимков Sentinel-2, цифровой модели рельефа и некоторых спектральных индексов, которые используются в алгоритме в качестве параметров. Перспективность подхода заключается в выявлении биофизических параметров борщевика Сосновского по его коэффициентам отражения с уточнением спектральной модели непосредственно по набору данных [21]. К наиболее популярным спектральным индексам, используемым для выявления ареалов борщевика Сосновского, относятся NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и ClGreen (Green Chlorophyll Index) [22]. Кроме того, разработан новый спектральный индекс борщевика Сосновского – *Heracleum Sosnowskyi Index (HSI)* [23]. В целом разработка системы мониторинга борщевика Сосновского по данным дистанционного зондирования Земли не оста-

навливают своего развития и направлена на увеличение точности его обнаружения.

Цель работы – разработка методики обнаружения участков распространения борщевика Сосновского на примере отдельных территорий городской среды по данным дистанционного зондирования Земли.

Материалы и методы исследования

Алгоритм обработки полученных спутниковых изображений включал в себя два основных этапа: подготовительный полевой и камеральный. На начальном этапе производили сбор информации на местности в ходе маршрутной съёмки. На камеральном этапе осуществляли поиск и обработку космических снимков исследуемой территории,

а также интерпретировали и корректировали данные. Далее создавали цифровые карты и производили на их основе расчёт площадей распространения борщевика Сосновского на отдельных территориях г. Кирова (рис. 1).

В качестве исходной спутниковой информации для обработки в различных программных продуктах наиболее часто используются снимки с таких космических аппаратов, как LandSat-8, Sentinel-2 и RapidEye. В данной работе для изучения ареалов распространения борщевика Сосновского использовали снимки со спутника Sentinel-2 с разрешением 10 м.

В качестве исследуемой территории был выбран участок массового зарастания борщевиком Сосновского площадью 10 км². Участок находился в южной части г. Кирова,

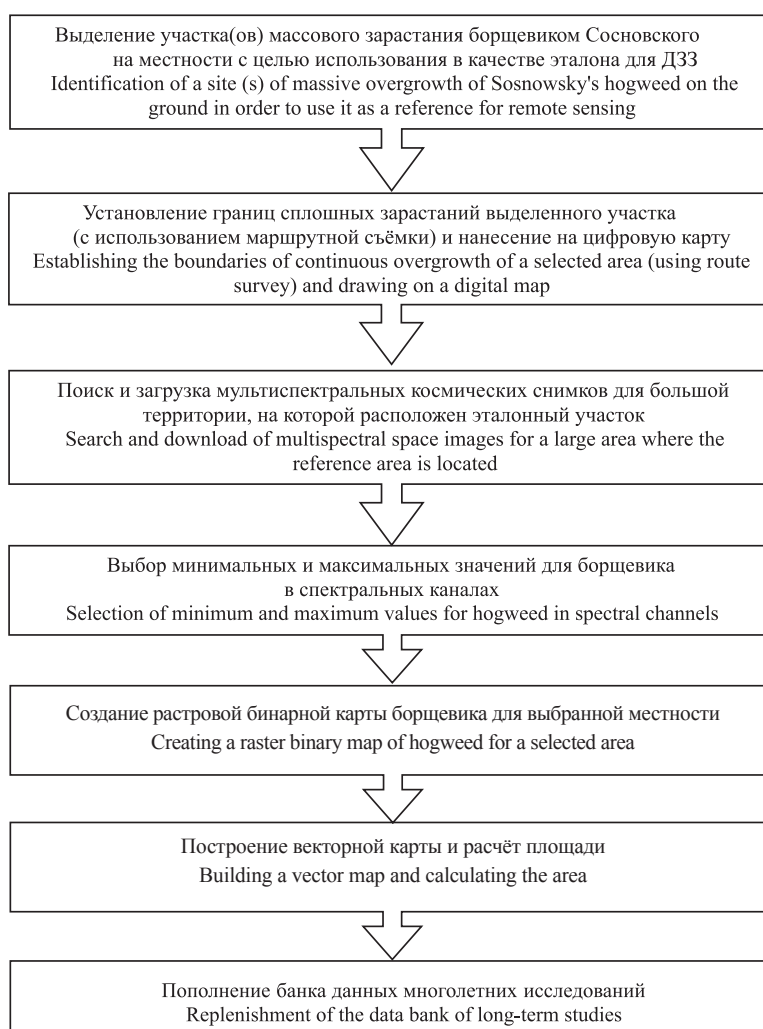


Рис. 1. Этапы обработки спутниковых изображений для обнаружения территорий, подверженных зарастанию борщевиком Сосновского
Fig. 1. The stages of satellite images processing to detect areas prone to overgrowing with Sosnowsky's hogweed

к западу от р. Вятки и представлял собой пригород с застройкой сельского типа, дачными участками и обширными неиспользуемыми землями вблизи д. Овчарное и д. Вахрино. Выбор участков был произведён в ходе полевого обследования территорий.

Снимки исследуемой территории за вегетационный период июнь – август 2016–2022 гг. были использованы с открытого сайта <https://eos.com/landviewer/>. Для обработки снимков применяли компьютерную программу QGIS-3.26. Для визуализации участков распространения борщевика Сосновского использовали каналы съёмки: В2 (синий), В3 (зелёный), В4 (красный) и В8 (ближний инфракрасный диапазон).

Результаты и обсуждение

В основе методики осуществляемого мониторинга лежали отличия в отражающей способности борщевика Сосновского от других объектов окружающей среды [21, 24]. В ходе исследования опирались на данные о том, что борщевик Сосновского имеет наиболее близкие значения яркости в синем и зелёном спектральных диапазонах, а наибольшие значения – в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне съёмки [23].

Обработка фрагментов снимков со спутника Sentinel-2 в программе QGIS-3.26 позволила представить их в псевдоцветном изображении. Борщевик Сосновского на полученных изображениях выделялся ярко-зелёным цветом. Спектральные яркости пикселей, соответствующих данному виду, отличались от фоновых значений пикселей (другая растительность, антропогенные объекты и др.). Синтезированное изображение позволило выявить участки зарастания борщевиком Сосновского на исследуемых территориях.

Далее в геоинформационной системе QGIS-3.26 при помощи инструмента «Определить объекты» были выбраны максимальные и минимальные значения каналов, характерные для борщевика Сосновского. Каналы были окрашены в различные цвета. В местах произрастания борщевика участок приобретал определённую окраску. Применялась дискретная классификация из трёх классов: первый – минимальное из определённого, цвет – белый; второй – максимальное, цвет зависит от канала (В2, В3, В4 и В8), в этом диапазоне и обнаруживаются участки произрастания борщевика Сосновского; третий – значение выше максимального было также окрашено

в белый цвет. При снижении прозрачности до 50% белый цвет на снимке становился прозрачным, что позволило накладывать и совмещать изображения. Далее, совмещённое из четырёх каналов изображение было экспортировано в формате PNG с геопривязкой.

Полученное изображение было отредактировано в растровом редакторе GIMP-2. При помощи инструмента «Выделение по цвету», со значением порога, равным 0, производили удаление всех объектов, не относящихся к борщевик Сосновского.

На рисунке 2 (см. цветную вкладку III) приведены карты отдельных участков на территории г. Кирова, на которых удалось чётко визуализировать борщевик Сосновского по вышеописанной методике.

При помощи встроенных инструментов в системе QGIS переводили растровое изображение в векторное для расчёта площади распространения борщевика Сосновского. Встроенная функция позволяет вычислять площадь в установленных единицах на плоскости или на референц-эллипсоиде, если он установлен в ГИС-проекте.

В работе производили подсчёт площадей участков массового роста борщевика Сосновского на одной и той же территории за 7 лет (рис. 3). При сопоставлении расчётных данных и полученных карт за период 2016–2022 гг. идентифицированные зоны были представлены участками сплошного зарастания и распределения его небольшими группами. Площадь участков за это время значительно не изменилась (исключение составили 2020 и 2022 гг.), при этом регистрировали точечное перераспределение участков распространения борщевика Сосновского в пределах исследуемой территории. Подобная трансформация могла быть связана с применением различных мер борьбы с данным видом (кошение, вспашка, использование гербицидов и др.) или, напротив, с их отсутствием.

На основании результатов, полученных на данном этапе, не представлялось возможным рассчитать скорость разрастания борщевика Сосновского на исследуемой территории. Эту задачу можно решить только в условиях непрерывного наблюдения. Однако возможно рассчитать изменение площадей участков сплошного зарастания борщевиком Сосновского. У данной методики есть ограничения, так как она может быть применена только к тем территориям, где борщевик Сосновского не подвергался выкашиванию, либо другому воздействию на протяжении многих лет. Сущность методики за-

**Т. Я. Ашихмина, В. В. Рутман, Т. А. Адамович, Е. В. Товстик
«Мониторинг распространения *Heracleum sosnowskyi*
на урбанизированных территориях по данным
дистанционного зондирования Земли». С. 73.**



Заросли борщевика Сосновского
Thickets of *Heracleum sosnowskyi*

a) 08.08.2016



Заросли борщевика Сосновского
Thickets of *Heracleum sosnowskyi*

b) 13.08.2017



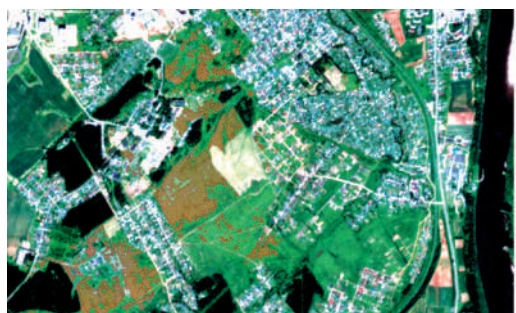
Заросли борщевика Сосновского
Thickets of *Heracleum sosnowskyi*

c) 17.06.2018



Заросли борщевика Сосновского
Thickets of *Heracleum sosnowskyi*

d) 09.06.2019



Заросли борщевика Сосновского
Thickets of *Heracleum sosnowskyi*

e) 16.08.2020



Заросли борщевика Сосновского
Thickets of *Heracleum sosnowskyi*

f) 23.06.2021



Заросли борщевика Сосновского
Thickets of *Heracleum sosnowskyi*

g) 06.07.2022

Рис. 2. Заросли борщевика Сосновского, выделенные на космических снимках
Fig. 2. Thickets of *Heracleum sosnowskyi*, identified on satellite images

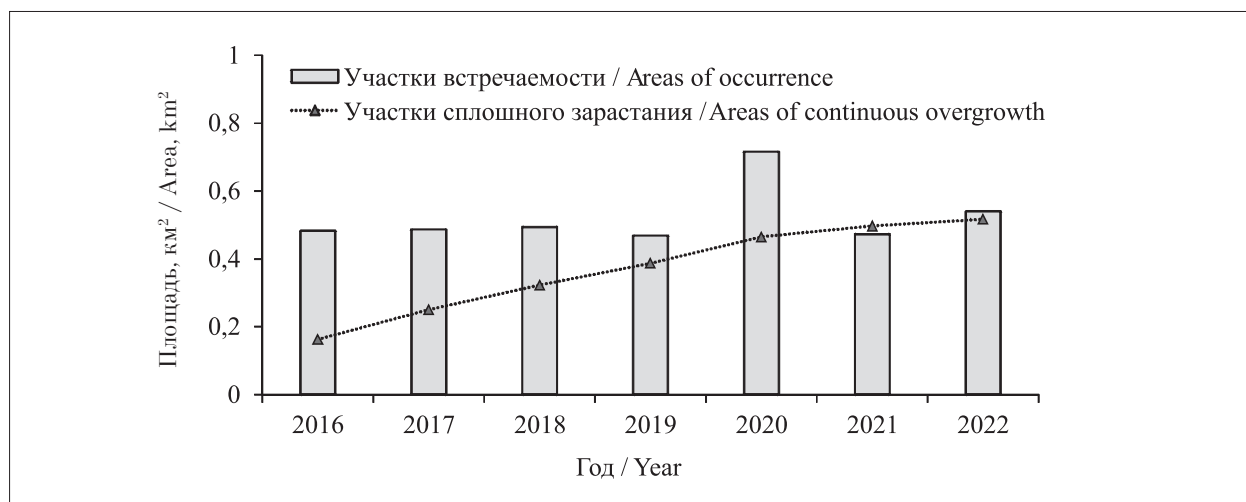


Рис. 3. Площадь территорий, занятых борщевиком Сосновского за 2016–2022 годы
 Fig. 3. Area occupied by Sosnowsky's hogweed for 2016–2022

ключается в том, что значение площади участков скопления борщевика Сосновского, полученное из векторной карты, вносится в программу для работы с таблицами, где производится подсчет разницы площадей по годам в квадратных метрах и в процентах по формуле:

$$R_{\%} = \frac{S_T - S_{II}}{S_{II}} \cdot 100,$$

где $R_{\%}$ – прирост борщевика на участке в процентах; S_T и S_{II} – площадь участков за текущий и предыдущий годы соответственно, м².

По результатам проведенных расчетов максимальный прирост борщевика Сосновского произошёл в период с 2016 г. по 2017 г. и составил 53,4% (рис. 3). За последующие годы наблюдений (2018–2021 гг.) сохранялась тенденция к увеличению площади участков сплошного зарастания борщевиком Сосновского на исследуемой территории (ежегодный прирост от 6,9 до 20,2%). Минимальный прирост (4%) отмечен в период с 2021 г. по 2022 г.

Заключение

В результате проведенной работы разработан новый метод обнаружения зон распространения борщевика Сосновского на отдельных участках г. Кирова по данным дистанционного зондирования Земли. Успешно решить поставленную задачу позволили космические снимки высокого разрешения с космического аппарата Sentinel-2. Использование в качестве исходной информации спутниковых снимков позволяет оперативно пополнять банк данных многолетних исследований в целях

мониторинга распространения борщевика Сосновского на отдельно взятых территориях. Предложенный в работе алгоритм обработки космических снимков позволил получить псевдоцветные изображения, с помощью которых была проведена классификация объектов окружающей среды, в том числе антропогенных, с выделением участков распространения борщевика Сосновского. С помощью полученных изображений был произведен расчёт площадей участков массового роста и сплошного зарастания территории исследуемым инвазивным видом.

Предложенная в работе методика обнаружения ареалов распространения борщевика Сосновского открывает новые возможности для мониторинга, а также для повышения эффективности мер борьбы с данным инвазивным видом.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Структура и состояние компонентов техногенных экосистем подзоны южной тайги», номер государственной регистрации в ЕГИСУ № 122040100032-5.

Литература

1. Diagne C., Leroy B., Gozlan R.E., Vaissière A.-C., Assailly C., Nuninger L., Roiz D., Jourdain F., Jarić I., Courchamp F. InvaCost, a public database of the economic costs of biological invasions worldwide // Scientific Data. 2020. V. 7. Article No. 277.
2. Сенатор С.А., Розенберг А.Г. Эколого-экономическая оценка ущерба от инвазивных видов рас-

тений // Успехи современной биологии. 2016. Т. 136. № 6. С. 531–538.

3. Юферев В.Г., Таранов Н.Н. Картографирование инвазивного загрязнения лесов Волго-Ахтубинской поймы с использованием ГИС технологий и результатов дистанционного зондирования // Известия НВ АУК. 2020. № 3 (59). С. 189–198.

4. Shrestha U.B., Shrestha B.V. Climate change amplifies plant invasion hotspots in Nepal // Diversity and Distributions. 2019. V. 25. No. 10. P. 1599–1612.

5. Banerjee A.K., Lee T.M., Feng H., Liang X., Lin Y., Wang J., Yin M., Peng H., Huang Y. Implications for biological invasion of non-native plants for sale in the world's largest online market // Conservation Biology. 2023. Article No. e14055.

6. Закон Московской области № 191/2014-ОЗ «О благоустройстве в Московской области» [Электронный ресурс] <https://gust.mosreg.ru/deyatelnost/knd/ot/kommentarii-o-soderzhanii-npa-ustanavliva-yushikh-obyazatelnye-trebovaniya-ot-vnesennykh-izmeneniya-kh-rekomendacii-o-provedenii-meropriyatii-po-soblyudeniyu-ot/17-10-2018-11-01-12-18-07-2018-v-zakon-moskovskoy-oblasti-191-2014-oz> (Дата обращения: 18.06.2023).

7. Петрова И.Ф., Королева Е.Г. Оценка опасности распространения борщевика Сосновского в России // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022. № 86 (5). С. 788–798.

8. Larson E.R., Graham B.M., Achury R., Coon J.J., Daniels M.K., Gambrell D.K., Jonasen K.L., King G.D., LaRacunte N., Perrin-Stowe T.I., Reed E.M., Rice C.J., Ruzi S.A., Thairu M.W., Wilson J.C., Suarez A.V. From eDNA to citizen science: emerging tools for the early detection of invasive species // Frontiers in Ecology and the Environment. 2020. V. 18. No. 4. P. 194–202.

9. Corbane C., Lang S., Pipkins K., Alleaume S., Deshayes M., Millán V.E.G., Strasser T., Borre J.V., Toon S., Michael F. Remote sensing for mapping natural habitats and their conservation status – New opportunities and challenges // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2015. V. 37. P. 7–16.

10. Yereña S., Toasa G., Kurbatova A.I. NDVI – alpha diversity relationship in tropical montane cloud forest of Ecuador // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 58–67.

11. Домнина Е.А., Адамович Т.А., Тимонов А.С., Ашихмина Т.Я. Мониторинг зарастания заброшенных земель сельскохозяйственного назначения по спутниковым снимкам высокого разрешения // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 82–89.

12. Кутявина Т.И., Рутман В.В., Ашихмина Т.Я. Дистанционный мониторинг зарастания высшей водной растительностью акватории эвтрофированного водохранилища // Теоретическая и прикладная экология. 2020. № 3. С. 36–40.

13. Григорьев А.Н., Зайцев В.В., Рыжиков Д.М., Чичкова Е.Ф. Способ определения параметров состояния

почвенно-растительного покрова по данным многоспектрального аэрокосмического зондирования // Патент Ru 2657363 С 1. Заявка: 2017113843, 20.04.2017. Дата публикации: 13.06.2018. Бюл. № 17.

14. Кравчук Л.А., Яновский А.А., Баженова Н.М., Пац А.Ч. Дифференцированная оценка зелёной инфраструктуры г. Минска с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Природопользование. 2019. № 2. С. 152–167.

15. Elvidge C.D., Lyon R.J.P. Influence of rock-soil spectral variation on the assessment of green biomass // Remote Sensing of Environment. 1985. V. 17. No. 3. P. 265–279.

16. Хайруллин Р.Р., Мишуков О.А. Метод автоматизированного определения типов лесного растительного покрова по материалам аэрокосмической съёмки // I-methods. 2021. Т. 14. № 4. С. 1–15.

17. Товстик Е.В., Адамович Т.А., Ашихмина Т.Я. Идентификация участков массового роста борщевика Сосновского с помощью спектральных индексов по данным Sentinel-2 // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 34–40.

18. Фомин Д.С., Чащин А.Н. Идентификация борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) по данным дистанционного зондирования Земли в Среднем Предуралье // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019. № 1 (75). С. 68–70.

19. Kornilov T., Terentev A., Kekelidze V. Use of a hardware-software complex for phytosanitary monitoring and chemical treatments of the Sosnowski hogweed // BIO Web of Conferences: IV All-Russian Plant Protection Congress with international participation “Phytosanitary Technologies in Ensuring Independence and Competitiveness of the Agricultural Sector of Russia”. 2020. V. 8. Article No. 00015.

20. Visockienė J.S., Tumelienė E., Maliene V. Identification of *Heracleum sosnowskyi*-invaded land using Earth remote sensing data // Sustainability. 2020. V. 12. No. 3. Article No. 759.

21. Уифтер Т.Т., Разумный Ю.Н., Орловский А.В., Лобанов В.К. Мониторинг распространения борщевика Сосновского с использованием алгоритма машинного обучения «случайный лес» в Google Earth Engine // Компьютерные исследования и моделирование. 2022. Т. 14. № 6. С. 1357–1370.

22. Богданов В.Л., Осипов А.Г., Гарманов В.В. Методика мониторинга засорения земель борщевиком Сосновского по данным дистанционного зондирования // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2020. № 2 (59). С. 69–74.

23. Рыжиков Д.М. Метод обработки мультиспектральных спутниковых данных для решения задачи контроля зон произрастания борщевика Сосновского // Информационно-управляющие системы. 2017. № 6 (91). С. 43–51.

24. Рутман В.В., Кантор Г.Я. Изучение распространения борщевика Сосновского по космическим снимкам высокого разрешения // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: Материалы XX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Киров: Вятский государственный университет, 2022. С. 267–270.

References

- Diagne C., Leroy B., Gozlan R.E., Vaissière A.-C., Assailly C., Nuninger L., Roiz D., Jourdain F., Jarić I., Courchamp F. InvaCost, a public database of the economic costs of biological invasions worldwide // *Scientific Data*. 2020. V. 7. Article No. 277. doi: 10.1038/s41597-020-00586-z
- Senator S.A., Rozenberg A.G. Ecological and economic assessment of damage from invasive plant species // *Uspekhi sovremennoy biologii*. 2016. V. 136. No. 6. P. 531–538 (in Russian).
- Yuferev V.G., Taranov N.N. Mapping of invasive forest pollution in the Volga-Akhtuba floodplain using GIS technologies and remote sensing results // *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa*. 2020. No. 3 (59). P. 189–198 (in Russian). doi: 10.32786/2071-9485-2020-03-19
- Shrestha U.B., Shrestha B.B. Climate change amplifies plant invasion hotspots in Nepal // *Diversity and Distributions*. 2019. V. 25. No. 10. P. 1599–1612. doi: 10.1111/ddi.12963
- Banerjee A.K., Lee T.M., Feng H., Liang X., Lin Y., Wang J., Yin M., Peng H., Huang Y. Implications for biological invasion of non-native plants for sale in the world's largest online market // *Conservation Biology*. 2023. Article No. e14055. doi: 10.1111/cobi.14055
- Law of the Moscow Region No. 191/2014-OZ “On Improvement in the Moscow Region” [Internet recourse] <https://gust.mosreg.ru/deyatelnost/knd/ot/kommentarii-o-soderzhanii-mpa-ustanavlivayushikh-obyazatelnyetrebvaniya-ot-vnesennykh-izmeneniyakh-rekomendacii-o-provedenii-meropriyatii-po-soblyudeniyu-ot/17-10-2018-11-01-12-18-07-2018-v-zakon-moskovskoy-oblasti-191-2014-oz> (Accessed: 18.06.2023) (in Russian).
- Petrova I.F., Koroleva E.G. Assessment of the distribution of Sosnowsky's hogweed in Russia // *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya*. 2022. No. 86 (5). P. 788–798 (in Russian). doi: 10.31857/S2587556622050090
- Larson E.R., Graham B.M., Achury R., Coon J.J., Daniels M.K., Gambrell D.K., Jonasen K.L., King G.D., LaRacunte N., Perrin-Stowe T.I., Reed E.M., Rice C.J., Ruzi S.A., Thairu M.W., Wilson J.C., Suarez A.V. From eDNA to citizen science: emerging tools for the early detection of invasive species // *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2020. V. 18. No. 4. P. 194–202. doi: 10.1002/fee.2162
- Corbane C., Lang S., Pipkins K., Alleaume S., Deshayes M., Millán V.E.G., Strasser T., Borre J.V., Toon S., Michael F. Remote sensing for mapping natural habitats and their conservation status – New opportunities and challenges // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2015. V. 37. P. 7–16. doi: 10.1016/j.jag.2014.11.005
- Yerena S., Toasa G., Kurbatova A.I. NDVI – alpha diversity relationship in tropical montane cloud forest of Ecuador // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 3. P. 58–67 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-058-067
- Domnina E.A., Adamovich T.A., Timonov A.S., Ashikhmina T.Ya. Monitoring of overgrowing of abandoned agricultural lands using high-resolution satellite images // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 3. P. 82–89 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-082-089
- Kutyavina T.I., Rutman V.V., Ashikhmina T.Ya. Remote monitoring of overgrowth of the eutrophied reservoir water area by higher aquatic vegetation // *Theoretical and Applied Ecology*. 2020. No 3. P. 36–40 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-3-036-040
- Grigorev A.N., Zaytsev V.V., Ryzhikov D.M., Chichkova E.F. Method for determining the parameters of the state of the soil and vegetation cover according to the data of multispectral aerospace sounding // Patent Ru 2657363 C 1. Application: 2017113843, 20.04.2017. Date of publication: 13.06.2018 (in Russian).
- Kravchuk L.A., Yanovskiy A.A., Bazhenova N.M., Pats A.Ch. Differentiated assessment of the green infrastructure of Minsk using the data of remote sensing of the Earth // *Prirodopolzovanie*. 2019. No. 2. P. 152–167 (in Russian).
- Elvidge C.D., Lyon R.J.P. Influence of rock-soil spectral variation on the assessment of green biomass // *Remote Sensing of Environment*. 1985. V. 17. No. 3. P. 265–279. doi: 10.1016/0034-4257(85)90099-9
- Khayrullin R.R., Mishukov O.A. The method for automated determination of forest cover types from aerospace images // *I-methods*. 2021. V. 14. No. 4. P. 1–15 (in Russian).
- Tovstik E.V., Adamovich T.A., Ashikhmina T.Ya. Identification of sites of mass growth of *Heracleum sosnowskyi* Manden. using spectral indices according to Sentinel-2 images // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 3. P. 34–40 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-034-040
- Fomin D.S., Chashchin A.N. Identification of Sosnowsky's hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) according to the remote sensing of the Earth in the Middle Ural // *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2019. No. 1 (75). P. 68–70 (in Russian).
- Kornilov T., Terentev A., Kekelidze V. Use of a hardware-software complex for phytosanitary monitoring and chemical treatments of the Sosnowsky's hogweed // *BIO Web of Conferences: IV All-Russian Plant Protection Congress with international participation “Phy-*

tosanitary Technologies in Ensuring Independence and Competitiveness of the Agricultural Sector of Russia". 2020. V. 8. Article No. 00015. doi: 10.1051/bioconf/20201800015

20. Visockienė J.S., Tumelienė E., Maliene V. Identification of *Heracleum sosnowskyi*-invaded land using Earth remote sensing data // Sustainability. 2020. V. 12. No. 3. Article No. 759. doi: 10.3390/su12030759

21. Yifter T., Razoumny Yu.N., Orlovsky A.V., Lobanov V.K. Monitoring the spread of Sosnowskyi's hogweed using a random forest machine learning algorithm in Google Earth Engine // Computer Research and Modeling. 2022. V. 14. No. 6. P. 1357–1370 (in Russian). doi: 10.20537/2076-7633-2022-14-6-1357-1370

22. Bogdanov V.L., Osipov A.G., Garmanov V.V. Methodology for monitoring of lands contamination by

Sosnovsky's hogweed according to remote sounding data // Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2020. No. 2 (59). P. 69–74 (in Russian). doi: 10.24441/2078-1318-2020-12069

23. Ryzhikov D.M. *Heracleum sosnowskyi* growth area control by multispectral satellite data // Informatiionno-upravlyayushchie sistemy. 2017. No. 6 (91). P. 43–51 (in Russian). doi: 10.15217/issn1684-8853.2017.6.43

24. Rutman V.V., Kantor G.Ya. Studying the distribution of Hogweed Sosnowski based on high-resolution satellite images // Biodiagnostics of the state of natural and natural-technogenic systems: Materialy XX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Kirov: Vyatskiy gosudarstvennyy universitet, 2022. P. 267–270 (in Russian).