

Вестник Московского университета

Серия 5 ГЕОГРАФИЯ

Издательство Московского университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 1946 г.

2026 • Т. 81 • № 4

ИЮЛЬ–АВГУСТ

Выходит один раз в два месяца

СОДЕРЖАНИЕ

Динамика природных процессов

Фокиев Е.В., Горбаренко Е.М., Суховеева О.Э., Сорокин А.С., Романенков В.А.,
Ольчев А.В. Динамика потоков диоксида углерода в смешанном лесу
при изменении температуры и осадков по результатам численного моделирования...3

Ткач А.А., Ткач Н.Т., Тихонова Т.И. Субвековая запись $\delta^{18}\text{O}$ Каспийского моря
как отражение эволюции бассейна в позднем плейстоцене – голоцене.....16

География и экология

Решетняк О.С., Комаров Р.С. Трансформация ионного стока реки Кубани
в условиях антропогенного воздействия.....27

Обыдённов А.Н. Смещение границ агроклиматических зон как следствие
глобального потепления (на примере Тамбовской области).....38

Метлицкий И.В., Киндеев А.Л., Кухлевский Е.А., Карпиченко А.А. Геоэкологическая
оценка состояния малых городов Беларуси (на примере г. Жабинки).....51

Методы географических исследований

Еремко З.С., Алтаев А.А., Лубсанова Н.Б., Осодоев П.В. Устойчивость лесного
комплекса в российских приграничных регионах на примере Забайкалья
и Амурской области.....65

Семакина А.В., Рысин И.И., Рублева Е.А., Губко Ж.В. Применение методов
дистанционного зондирования при оценке влияния почв на распространение
борщевика.....79

Региональные исследования

Котенков А.В., Лебедева Е.В. Рельефообразование в Узон-Гейзерной депрессии
(Восточный вулканический пояс, Камчатка).....93

Никулина И.В., Мысленков С.А., Латковская Е.М., Пицальник В.М. Штормовые
выбросы макрофитов в прибрежной зоне залива Анива: пространственная
структура, состав и эмиссионный потенциал.....107

Вдовкин Е.И. Роль практического знания в географии инновационной активности
на примере солнечной и ветровой энергетики Европы.....121

Григорьев В.А. Ландшафтная полоса расселения на территории Российской
Федерации134

Краткое сообщение

Пасхина А.А., Дьяконов К.Н., Безделова А.П. Динамика видового состава
среднетаежных лесов юга Архангельской области на рубеже XX–XXI вв.
в условиях изменяющегося климата.....148

CONTENTS

Dynamics of natural processes

- Fokeev E.V., Gorbarenko E.M., Sukhoveeva O.E., Sorokin A.S., Romanenkov V.A., Olchev A.V.* Dynamics of carbon dioxide fluxes in a mixed forest under changing temperature and precipitation based on the numerical simulation results.....3
- Tkach A.A., Tkach N.T., Tikhonova T.I.* Sub-centennial $\delta^{18}\text{O}$ record of the Caspian Sea as a reflection of basin evolution during the late Pleistocene and the Holocene.....16

Geography and ecology

- Reshetnyak O.S., Komarov R.S.* Transformation of the ionic flux of the Kuban river under the anthropogenic impact.....27
- Obydenov A.N.* Shifting of the boundaries of agroclimatic zones as a result of global warming (case study of the Tambov region).....38
- Metlitsky I.V., Kindeev A.L., Kuhlevski E.A., Karpichenko A.A.* Geoecological assessment of small towns in Belarus (case study of the town of Zhabinka).....51

Methods of geographical research

- Eremko Z.S., Altaev A.A., Lubsanova N.B., Osodoev P.V.* Sustainability of the forest complex in Russian border regions: a case study of the Transbaikalian region and the Amur oblast.....65
- Semakina A.V., Rysin I.I., Rubleva E.A., Gubko J.V.* Application of remote sensing methods for assessing the impact of soil cover properties on the spread of hogweed.....79

Regional studies

- Kotenkov A.V., Lebedeva E.V.* Landforms shaping in the Uzon-Geysernaya depression (Eastern volcanic belt, Kamchatka).....93
- Nikulina I.V., Myslenkov S.A., Latkovskaya E.M., Pischalnik V.M.* Storm deposit of macrophytes in the coastal zone of the Aniva bay: spatial structure, composition, and emission potential.....107
- Vdovkin E.I.* The role of practical knowledge in the geography of innovation activities: the example of solar and wind energy in Europe.....121
- Grigoriev V.A.* Landscape band of settlement within the territory of the Russian Federation.....134

Short communication

- Pashkina A.A., Dyakonov K.N., Bezdelova A.P.* Dynamics of species composition of the middle taiga forests in the south of the Arkhangelsk oblast under the changing climate on the cusp of the 20th and 21st centuries.....148

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ПОЧВ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ БОРЩЕВИКА

А.В. Семакина¹, И.И. Рысин², Е.А. Рублева³, Ж.В. Губко⁴

^{1,2,4} Удмуртский государственный университет, Институт естественных наук, кафедра экологии и природопользования

³ Удмуртский государственный университет, Институт естественных наук, кафедра географии, картографии и геоинформатики

¹ Доц., канд. геогр. наук; e-mail: alsen13@list.ru

² Проф., д-р геогр. наук; e-mail: rysin.iwan@yandex.ru

³ Доц., канд. геогр. наук; e-mail: rea197@mail.ru

⁴ Аспирант; e-mail: zhannagreen@yandex.ru

В статье представлена методология региональной адаптации подходов к оценке ареалов распространения борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi*) с применением методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и учетом характеристик почвенного покрова. Исследование выполнено на примере центральной части Удмуртской Республики (площадь анализируемой территории – 3430,3 км²), где наблюдается активное распространение данного инвазивного вида. Цель работы заключалась в определении площади ареалов произрастания борщевика и прогнозировании направлений его дальнейшей инвазии с учетом ландшафтно-почвенных условий. Для достижения поставленной цели осуществлено выявление районов распространения вида на основе анализа многозональных космических снимков OLI/Landsat-8 за весенний период 2025 г., проведена верификация данных ДЗЗ посредством полевых маршрутных исследований, создана актуализированная карта почвенного покрова территории с использованием данных дистанционного зондирования, результатов полевых наблюдений и опубликованных картографических материалов, а также выполнена оценка риска активной инвазии для различных участков с учетом свойств почв и особенностей землепользования. Обработка данных включала расчет вегетационных индексов – нормализованного разностного вегетационного индекса (*NDVI*), относительного индекса хлорофилла (*CIGreen*) и индекса борщевика Сосновского (*HSI*) – с последующей картографической визуализацией ареалов в среде QGIS и векторизацией площадей в Easy Trace. В результате исследования установлена средняя площадь ареала борщевика Сосновского, рассчитанная по данным мультиспектральной съемки за май 2025 г., – 51,56 км². Площади, определенные по отдельным индексам, составили: для *NDVI* – 48,41 км², для *CIGreen* – 56,25 км², для *HSI* – 50,11 км². Относительное расхождение между результатами ДЗЗ и полевыми данными варьировало от 1,2 до 10,9%, что подтверждает валидность выбранного подхода. Анализ пространственного распределения показал, что 56,4% общей площади, занятой борщевиком, приурочено к нераспаханным пойменным участкам, а 23,1% – к зарастающим сельскохозяйственным угодьям. Наибольшая встречаемость вида отмечена на аллювиальных дерновых кислых и болотных почвах (43,2% ареала), почвах овражно-балочного комплекса (26,6%) и подзолистых/дерново-подзолистых почвах (16,1%). Текущая доля занятых борщевиком площадей среди указанных разновидностей почв составляет 1,3%, а площадь территорий с высоким риском инвазии оценена в 315 км².

Ключевые слова: многозональные снимки, борщевик Сосновского, вегетационные индексы, почвенный покров, землепользование

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.81.4.7

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, благодаря способности к агрессивной инвазии в естественные экосистемы, ситуация с распространением в европейской части России борщевика Сосновского носит стихийный характер. Согласно исследованиям [Петрова, Королева, 2022], Удмуртская Республика (УР) относится к территории с высокой опасностью риска активной инвазии борщевика Сосновского. Для определения продуктивности и биомассы растительности с при-

менением многоканальных снимков рассчитываются вегетационные индексы. В настоящее время существует более 150 различных вегетационных индексов, разработанных экспериментальным путем на основе характеристик кривых спектральной отражательной способности растительности и почв [Index DataBase, 2026]. Для эффективного анализа растительного покрова и фитомассы борщевика Сосновского применяются нормализованный разностный вегетационный индекс (*NDVI*) [Рыжиков, 2019] и

вегетационный индекс хлорофилла (CIGreen) [Письман и др., 2021; Богданов и др., 2020; Qi et al., 1994]. Д.М. Рыжиковым предложен индекс борщевика Сосновского HSI [Рыжиков, 2019]. Более подробно указанные вегетационные индексы будут рассмотрены в разделе «Материалы и методы исследования».

В настоящий момент перед учеными стоит задача не только определения площади засорения территории России данным инвазивным видом, но и формирование прогноза изменения ареалов на отдельных территориях. К факторам, способствующим активному распространению данного вида, относятся: отсутствие контроля состояния брошенных посевов, наличие большого числа нарушенных экотопов, «открытых» для инвазий, высокая плодovitость и эффективность распространения семян наряду с отсутствием естественных врагов. Ограничивающим фактором распространения борщевика является плотность фитоценоза территории, на поверхность которой попали плоды. Исследования влияния степени засушливости территории на распространение борщевика [Афонин, 2017] показали, что максимальная встречаемость рассматриваемого инвазивного вида характерна для территорий, характеризующихся гумидным климатом. Исследование влияния на распространение борщевика Сосновского суммы активных температур показало, что данное растение характеризуется высокой устойчивостью к низким температурам [Чадин, 2018]. Влияние почв на распространение рассматриваемого инвазивного растения изучено в меньшей степени [Ламан и др., 2009].

Почвенный покров является специфической пространственно-временной системой, которой свойственна высокая степень неоднородности. Из-за необходимости проведения огромного объема наземных исследований практически невозможно достаточно точное описание такой сложной системы с применением традиционных методов исследования. Одним из научно-методических подходов, обеспечивающих решение этой проблемы и исключающих присущие традиционным методам недостатки и ограничения, является их синтез с методами дистанционного зондирования Земли. При этом анализ и интерпретация дистанционной информации должны обязательно опираться на данные наземных наблюдений [Мазиков, 2001]. Характеристика типов и свойств почв с применением данных ДЗЗ возможна при использовании двух подходов: косвенная характеристика на основе принципов ландшафтно-географического районирования; анализ спектральной отражательной способности верхнего слоя почв [Кравцова, 2005].

Первый подход методологически сводится к учету региональных особенностей почв на основе ха-

рактеристики растительного покрова, полученной с применением данных ДЗЗ, а также анализа результатов современных исследований, фоновых данных, материалов тематического картографирования и другой информации, отражающей геоморфологическое строение, рельеф, растительный покров, характер использования территории и т. д. [Терехин, 2024; Мазиков, 2001].

Второй подход основан на анализе спектральной отражательной способности верхнего слоя почвенного покрова. Исследования свойств почв (содержание гумуса, структура, влажность, засоленность) с применением спектрального анализа отражательных свойств проводились для отдельных участков территорий РФ и за рубежом [Савин, 2021; Конюшкова, 2014; Пономаренко, 2014; Bannari et al., 2008]. Научно-техническое содержание методики диагностики свойств почв с применением ДЗЗ должно меняться в зависимости от зональных и региональных особенностей почв [Луков, 2001; Мазиков, 2001].

Несмотря на подтвержденную эффективность применения данных ДЗЗ для оценки ареалов борщевика Сосновского [Савин, 2021], в существующей методологии отсутствует региональная адаптация подходов к оценке рисков инвазий данного вида.

Цель исследования – региональная адаптация существующих подходов к определению площади ареалов распространения борщевика Сосновского и прогноз возможных направлений инвазии с учетом свойств почвенного покрова.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- 1) выявление районов распространения борщевика Сосновского на основе анализа многоспектральных снимков в пределах центральной части Удмуртской Республики;
- 2) верификация полученной при помощи анализа данных ДЗЗ информации о локализации и площади ареалов борщевика Сосновского;
- 3) создание актуализированной карты почвенного покрова исследуемой территории на основе данных дистанционного зондирования, полевых исследований и ранее опубликованных материалов;
- 4) оценка риска активной инвазии для различных участков территории с учетом свойств почвенного покрова.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Алгоритм проведения исследования представлен на рисунке 1.

Характеристика территории проведения исследований. В рамках данного исследования для оценки площади и прогнозов расширения ареалов распространения борщевика Сосновского была выбрана территория центральной части Удмурт-

ской Республики (УР). Площадь анализируемой территории составила 3430,3 км². В ландшафтном отношении (согласно классификации В.И. Стурмана [Стурман, 1996]) территория исследования частично охватывает территории, представленные на рисунке 2.

В целом территория характеризуется слаборасчлененным рельефом. В северной части исследуемой территории преобладают пихтово-еловые леса с примесью березы и осины. В южной части территории исследования значительную часть занимают сельскохозяйственные поля (в т. ч. зарастающие) с отдельными березово-осиново-еловыми лесными участками.

Выбор данной территории в рамках оценки распространения ареалов борщевика Сосновского опирался на следующие основания:

1. Территория исследования находится в пределах, освоенных в аграрном отношении ландшафтов. Наличие заброшенных участков сельскохозяйственных полей создает благоприятные условия для инвазии борщевика Сосновского. Наличие различных по форме, размерам и степени представленности инвазивного вида ареалов способствует получению разнообразных в пространственном отношении данных и формированию корректной методики определения ареалов распространения с применением ДЗЗ.

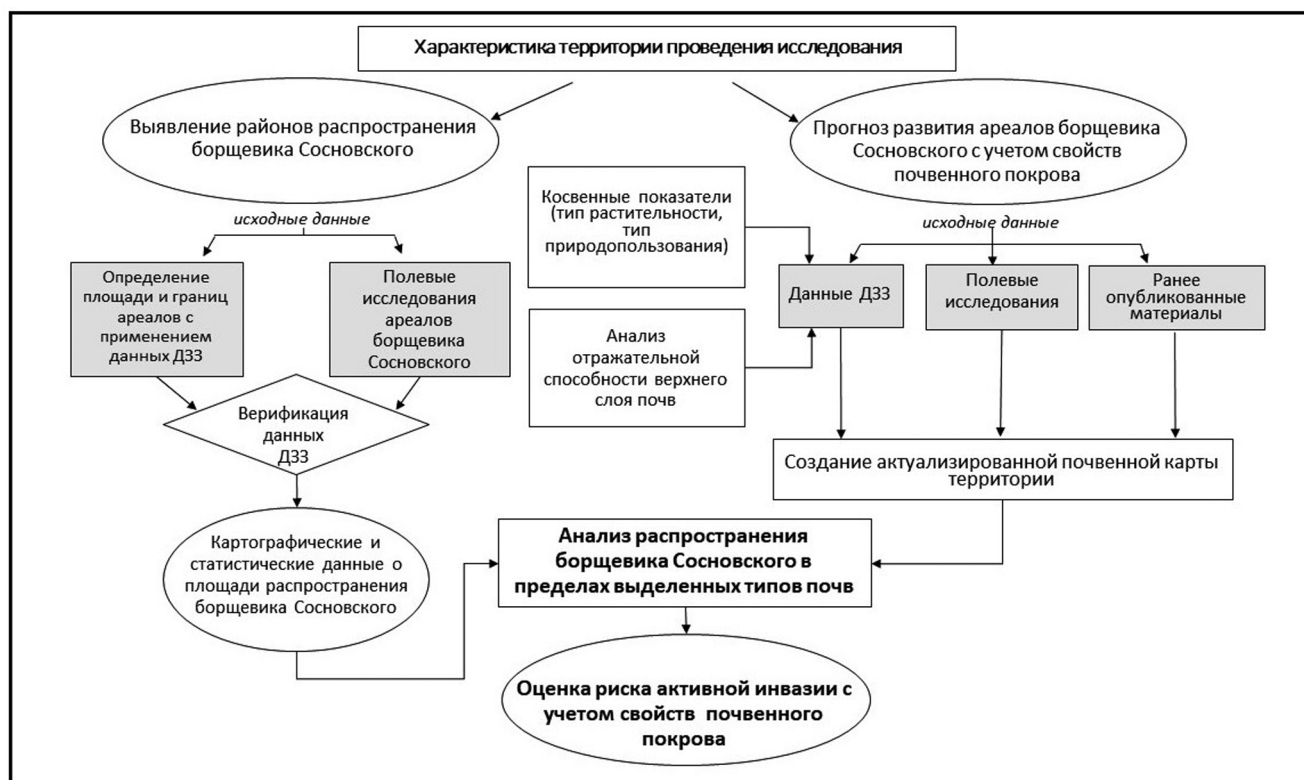


Рис. 1. Алгоритм проведения исследования

Fig. 1. Research algorithm

2. Охват территории на используемых космических снимках в максимально-доступном разрешении, что позволяет исключить погрешности, связанные с разновременным характером исследования.

Выявление районов распространения борщевика Сосновского осуществлялось с применением данных дистанционного зондирования и полевых (маршрутных) исследований.

Характеристика районов произрастания борщевика Сосновского по данным спутника OLI/Landsat-8 проводилась посредством расчета вегетационных индексов в программе QGIS:

1. Расчет вегетационного индекса *NDVI* [Рыжиков, 2019]. Коэффициент *NDVI* рассчитывался по формуле:

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

где *NIR* – отражение в ближней инфракрасной области спектра; *RED* – отражение в красной области спектра.

2. Расчет относительного индекса хлорофилла *CIGreen* [Письман и др., 2021] рассчитывался по формуле:

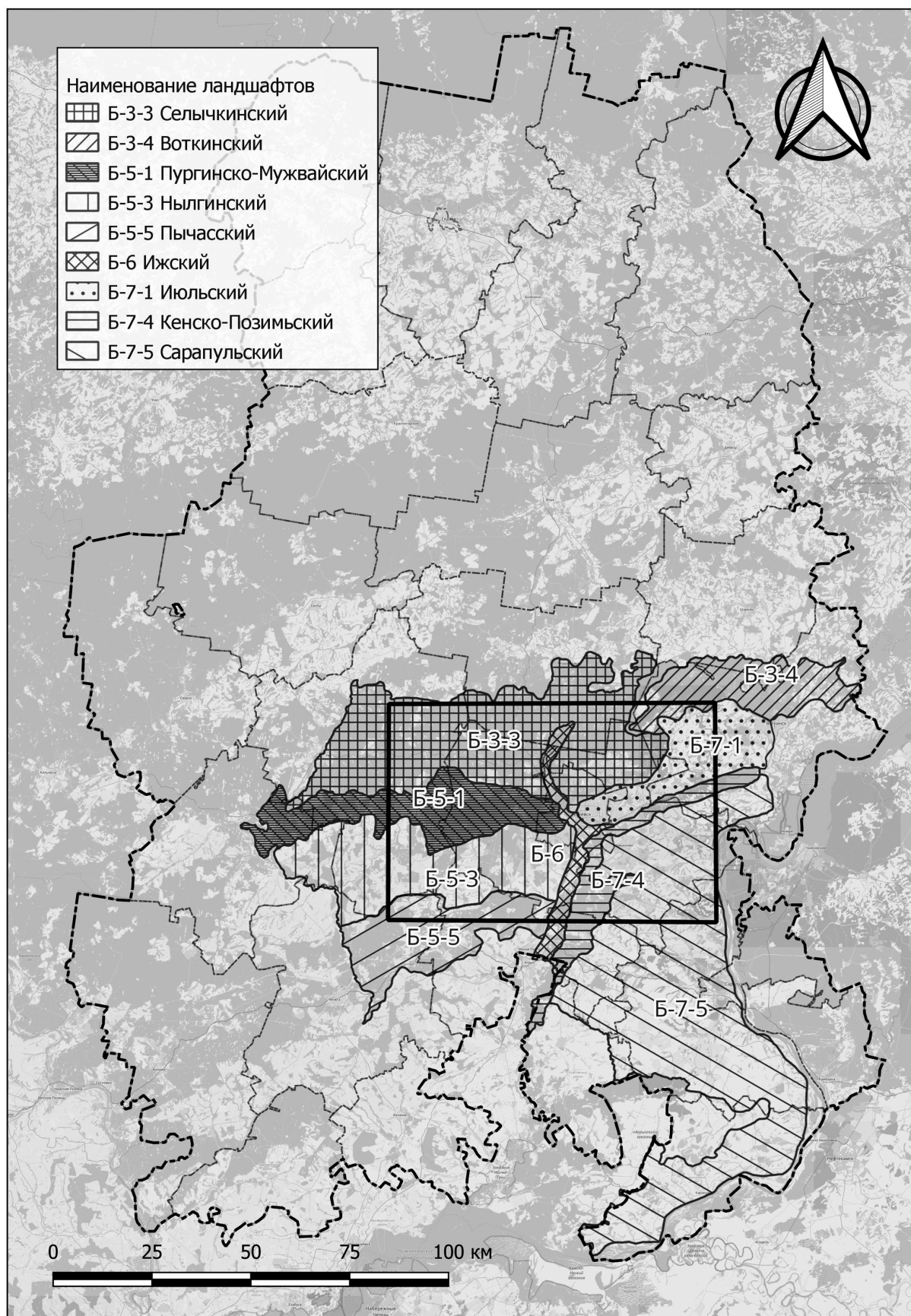


Рис. 2. Территория проведения исследования ареалов распространения борщевика Сосновского с применением методов ДЗЗ

Fig. 2. The territory of the study of the distribution areas of the sosnovsky hogweed using remote sensing methods

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

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра, $GREEN$ – отражение в зеленой области спектра.

3. Расчет вегетационного индекса Сосновского HSI [Рыжиков, 2019] рассчитывался по формуле:

$$HSI = \frac{NIR}{Ks + GREEN + BLUE}, \quad (3)$$

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра, $GREEN$ – отражение в зеленой области спектра, $BLUE$ – отражение в синей области спектра, Ks – поправочный коэффициент, постоянный для каждого типа источника данных. Для космических снимков OLI/Landsat-8 значение $Ks = -10$.

4. Картографическая визуализация ареалов борщевика Сосновского в виде отдельных ГИС-слоев в программе QGIS.

5. Расчет площади ареалов борщевика Сосновского в пределах исследуемой территории посредством их векторизации с применением программного продукта Easy Tracer.

В связи с особенностью вегетационного поведения борщевика Сосновского (быстрый прирост биомассы в ранневесенний период) наиболее контрастные значения вегетационных индексов могут быть получены при обработке снимков за май (начало вегетации) [Солтисьяк и др., 2015]. В рамках дальнейшего анализа были использованы актуализированные данные о границах ареалов борщевика Сосновского в весенний период (май) 2025 г.

Натурные исследования ареалов борщевика Сосновского в пределах рассматриваемой территории осуществлялись в формате полевых маршрутов в весенний период 2025 г. Границы ареалов распространения фиксировались с применением GPS-навигатора. В рамках данного исследования осуществлялся учет ареалов борщевика Сосновского площадью от 0,0025 км².

Прогноз развития ареалов борщевика Сосновского с учетом свойств почвенного покрова опирался на анализ картографического материала, содержащего информацию об ареалах распространения рассматриваемого инвазивного вида и разнообразия почв.

Для исследуемой территории последнее обновление картографического материала в части характеристики почвенного покрова осуществлялось в начале 1990-х гг. [Завьяловский..., 2000]. В рамках данного исследования была осуществлена актуализация почвенной карты для рассматриваемой территории с применением следующих материалов: данные дистанционного зондирования, данные по-

левых исследований, ранее опубликованные картографические материалы.

Характеристика почвенного покрова по данным ДЗЗ может опираться на косвенные показатели и на анализ отражательной способности верхнего слоя почв.

Характеристика почв на занятой растительным покровом территории осуществлялась по косвенным показателям (тип землепользования, биоиндикационные признаки растительных сообществ). Выделение территорий с тем или иным типом землепользования осуществлялось на основе визуального дешифрирования снимков в натуральной цветопередаче, рекогносцировки местности и литературных источников [Завьяловский..., 2000]. В связи со значительной площадью искусственных покрытий и большой долей техногенно перемещенных грунтов в рамках данного исследования оценка почвенного покрова в пределах земель поселений, земель инфраструктуры и промышленности не проводилась.

При характеристике растительности были использованы космические снимки OLI/Landsat-8 за вегетационный период 2024 г. Характеристика растительности осуществлялась посредством классификации мультиспектральных изображений с применением алгоритма K-Means. В пределах исследуемого участка с учетом данных рекогносцировки местности и литературного обзора были выделены семь кластеров, имеющих схожие характеристики спектрального отражения.

Оценка состояния почвенного покрова на занятой растительным покровом территории опиралась на биоиндикационные свойства растительности и выделение характерных почвенно-растительных ассоциаций [Шмидт и др., 2022]. На зарастающих сельскохозяйственных угодьях фиксировались следующие типы и подтипы почв: серые лесные и дерново-карбонатные, подзолистые и дерново-подзолистые.

Характеристика незанятых растительностью участков почв (распахиваемых сельскохозяйственных угодий) осуществлялась посредством анализа спектральной отражательной способности верхнего слоя почв. Анализ свойств почвенного покрова на основе отражательной способности верхнего слоя почв осуществлялся на основании данных космических снимков за весенний период 2025 г. В рамках анализа распахиваемых сельскохозяйственных угодий была использована комбинация каналов GREEN, NIR, SWIR 3 космического снимка OLI/Landsat-8 [Мазилов, 2001]. В рамках дальнейшей кластеризации изображения с учетом данных полевых маршрутных исследований почв в пределах распахиваемых сельскохозяйственных угодий были выделены: 1) подзолистые и дерново-подзолистые; 2) серые лесные и дерново-карбонатные почвы.

Для получения итоговой карты почвенного покрова на основе созданного картографического материала (результаты анализа спектрального отражения верхнего слоя почв, карты землепользования и растительности) была построена клеточная матрица параметров компонентов. В качестве элементарной единицы матрицы был взят один пиксель, соответствующий на местности участку территории размером 30×30 м. Логическое сложение тематических слоев в пространстве матрицы было осуществлено с применением инструмента Vector overlay (Union multiple).

Поскольку специфика используемых данных ДЗЗ не позволяет получить детальную карту с выделением широкого перечня разновидностей почв, постольку для детализации и проверки полученных результатов были использованы данные полевых исследований и материалы ранее опубликованных почвенных карт [Атлас..., 2020; Природопользова-

ние, 2013; Завьяловский..., 2000; Почвенная карта..., 1990].

Полевые маршрутные исследования почв осуществлялись в соответствии с общепринятой методикой и включали закладку пяти почвенных разрезов, 25 полуям, 60 прикопок. Почвенные разрезы, прикопки и полуямы заложены на контрольных точках с использованием географической привязки с применением GPS-навигатора.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика ареалов произрастания борщевика Сосновского. По результатам обработки многозональных снимков OLI/Landsat-8 для весеннего периода 2025 г. были рассчитаны вегетационный индекс *NDVI*, относительный индекс хлорофилла *CIGreen*, индекс борщевика Сосновского *HSI* (рис. 3).

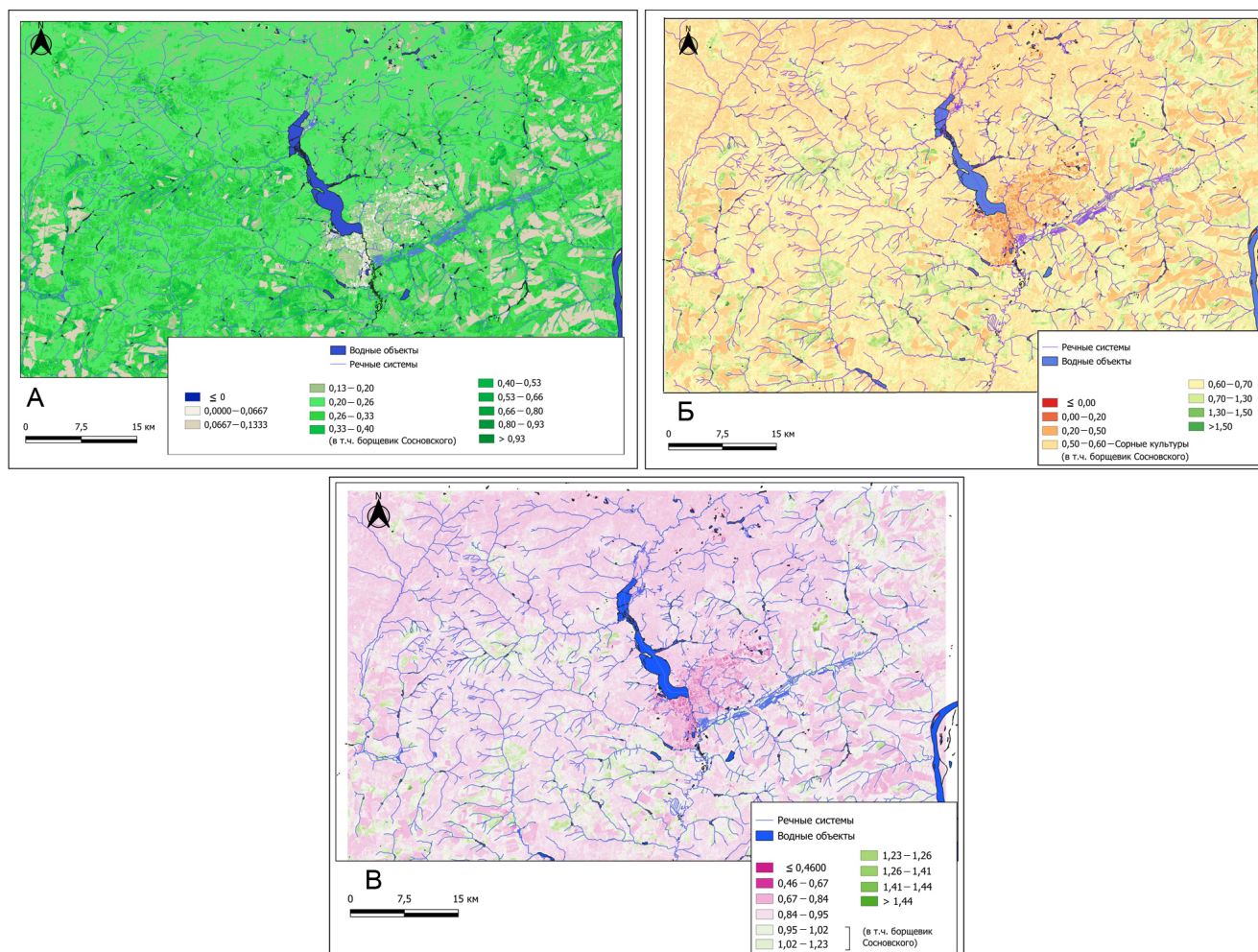


Рис. 3. Расчет индексов для территории центральной части Удмуртской Республики (май 2025 г.):

А – вегетационный индекс *NDVI*; Б – относительный индекс хлорофилла *CIGreen*; В – индекс борщевика Сосновского *HSI*

Fig. 3. Calculation of indices for the central part of the Udmurt Republic (May 2025):

А – *NDVI* vegetation index; Б – *CIGreen* relative chlorophyll index; В – *HSI* *Heracleum sosnovskyi* index

Согласно данным литературного обзора [Письман и др., 2021; Богданов, 2020; Рыжиков, 2019; Qi et al., 1994] и результатам эмпирических исследований, проведенных для рассматриваемой территории [Губко, 2023], в рамках данного исследования в качестве ареалов произрастания борщевика Сосновского были приняты участки территории со следующими значениями вегетационных индексов, представленными на рис. 3. Расчетная площадь ареалов распространения борщевика Сосновского для исследуемой территории с применением вегетационного индекса *NDVI* составила 48,41 км², индекса *CIGreen* – 56,25 км², индекса *HSI* – 50,11 км². В целом анализ площадей распространения борщевика Сосновского, определенных с использованием индексов *NDVI*, *CIGreen* и *HSI*, выявил схожие пространственные закономерности на крайних значениях.

По данным обработки мультizonального снимка, полученного в мае 2025 г., средняя площадь ареала борщевика Сосновского составила 51,56 км². Диапазон значений площади, рассчитанных по различным вегетационным индексам, достиг 7,84 км², что составляет 15,2% от среднего значения. Рассчитанные площади ареалов борщевика Сосновского по индексам *NDVI*, *CIGreen* и *HSI* (в отличие от ареалов других классов растительности) для исследованной территории характеризуются тесной корреляционной связью высокой статистической значимости (доверительная вероятность – 0,999, число степеней свободы – 2236). Значения коэффициента корреляции Пирсона между площадями, полученными с использованием различных вегетационных индексов, варьировались от 0,81 до 0,96. Коррелированный подход в расчете ареалов произрастания борщевика Сосновского при использовании указанных индексов позволяет предположить повышение эффективности оценки площадей при их объединении методом оверлея (логического сложения слоев).

В ландшафтном отношении в весенний период наибольшей степенью засоренности территории борщевиком характеризуются Сарапульский и Кенско-Позимский ландшафты. Значительная степень инвазии данного сорного растения в пределах указанных ландшафтов может быть объяснена особенностями типов землепользования на данной территории: сельскохозяйственные угодья (в т. ч. зарастающие) и нераспаханные пойменно-луговые территории.

Результаты верификации расчетных размеров ареалов борщевика Сосновского с данными натурных исследований представлены в таблице. В связи с ограниченным пространственным разрешением используемых космических снимков OLI/Landsat-8 для верификации были использованы ареалы инвазивного вида с площадью от 0,0025 км².

Таким образом, расхождения абсолютных значений площади, занятой борщевиком Сосновского, определенных по данным ДЗЗ и по результатам полевых исследований составили от 6300 до 98 100 м². В относительных величинах расхождение составило от 1,2 до 10,9%. Полученные результаты совпадают в крайних значениях с имеющимися наработками в области применения методов ДЗЗ при оценке ареалов распространения борщевика Сосновского. Основные расхождения связаны со значительным влиянием специфических особенностей местности на результаты обработки космических снимков. Необходимо отметить, что наименьшие значения погрешности были зафиксированы в случае картографического «наложения» ареалов, полученных с помощью вегетационных индексов.

Анализ ареалов борщевика Сосновского и прогноз их развития в пределах выделенных разновидностей почв. Характеристика выделенных почв на занятой растительным покровом территории осуществлялась по косвенным показателям (тип землепользования и характер растительного покрова), материалам почвенного шурфования в пределах выделенных однородных участков.

Выделение типов землепользования в пределах рассматриваемой территории осуществлялось с применением данных ДЗЗ. На рис. 4А представлены выделенные в ходе исследования типы землепользования в пределах рассматриваемой территории.

Формирование актуализированной карты растительности проводилось на основе анализа литературных источников [Ильминских, 2021; Атлас, 2020; Туганаев и др., 2015; Ильминских, 2014; Завьяловский..., 2000], данных космической съемки и материалов полевых маршрутных исследований территории (см. рис. 4Б). В общем случае на занятых многолетней растительностью территориях были выделены следующие растительно-почвенные ассоциации: хвойные леса на подзолистых и дерново-подзолистых почвах, пойменные и заболоченные луга на аллювиальных дерновых и болотных почвах, березово-осиновые леса на дерново-карбонатных и серых лесных почвах.

Характеристика незанятых растительностью участков почв (распаханные участки сельскохозяйственных угодий) осуществлялась посредством анализа спектральной отражательной способности верхнего слоя почв на основании данных космических снимков за весенний период 2025 г. и полевых маршрутных исследований. Общая площадь незанятых растительностью земель, доступных для анализа отраженного спектра, составила 6,9% (распахиваемых сельскохозяйственных угодий).

**Площади ареалов распространения борщевика Сосновского по данным ДЗЗ
и полевых наблюдений**

№ п/п	Координаты геометрического центра ареала борщевика Сосновского	Площадь ареала распространения борщевика Сосновского, м ²				
		По данным расчета с применением индекса			Наложение результатов расчета индексов	По данным полевых наблюдений
		<i>NDVI</i>	<i>CIGreen</i>	<i>HSI</i>		
1	56,850175, 53,329914	8100	11 700	9000	11 700	11 700
2	56,850693, 53,311546	9900	12 600	11 700	12 600	12 600
3	56,837146, 53,345106	37 800	45 000	43 200	45 000	45 000
4	56,833712, 53,342102	5400	8100	9900	9900	8100
5	56,829524, 53,347337	28 800	29 700	36 000	36 000	35 100
6	56,748465, 53,307835	250 200	251 100	253 800	253 800	252 000
7	56,738385, 53,214442	50 400	55 800	53 100	55 800	55 800
8	56,760644, 53,369167	26 100	28 800	27 900	28 800	28 800
9	56,770150, 53,376719	50 400	52 200	54 900	54 900	52 200
10	56,826094, 53,342674	16200	22 500	20 700	22 500	22 500
11	56,863087, 53,086905	45 900	54 000	46 800	54 000	54 000
12	56,923093, 52,812763	36 900	44 100	44 100	44 100	44 100
13	56,899931, 52,773812	10 800	11 700	11 700	11 700	11 700
14	56,910822, 53,255004	45 000	52 200	53 100	53 100	52 200
15	56,846347, 53,319959	46 800	53 100	54 900	54 900	53 100
16	56,809795, 53,382573	19 800	27 900	25 200	27 900	27 900
17	56,788639, 53,663376	32 400	39 600	33 300	39 600	39 600
18	56,773208, 53,455511	13 500	19 800	20 700	20 700	19 800
19	56,755006, 53,231851	60 300	63 000	62 100	63 000	63 000
20	56,820670, 53,125482	3600	7200	5400	7200	7200
<i>Итого</i>		<i>798 300</i>	<i>890 100</i>	<i>877 500</i>	<i>907 200</i>	<i>896 400</i>
Расхождение значений площади борщевика Сосновского, полученных расчетным путем и по данным полевых наблюдений, м ²		98 100	6300	18 900	10 800	

На участках распаханых сельскохозяйственных угодий были выделены следующие типы и подтипы почв: подзолистые и дерново-подзолистые (65,1%), серые лесные и дерново-карбонатные (34,5%). Полученные результаты в общем виде согласуются с данными предыдущих исследований и отличаются от них большей детализацией. Для исследуемой территории были выделены типы, подтипы и разновидности почв, представленные на рис. 5.

Согласно созданному картографическому материалу, в пределах рассматриваемой территории преобладают следующие почвы: подзолистые и дерново-подзолистые (66,6%), серые лесные и дерново-карбонатные 10,3% и почвы овражно-балочного комплекса (8,8%).

Анализ полученного картографического материала позволил выявить *некоторые пространственные особенности произрастания борщевика Сосновского*. Анализируя особенности распространения борщевика, можно отметить, что в пределах нераспаханных пойменных участков территории расположено 56,4% от общей площади, занятой инвазивным видом. Второе место по распространению борщевика Сосновского приходится на зарастающие сельскохозяйственные поля (23,1%).

Рассматриваемый инвазивный вид растения произрастает в пределах следующих разновидностей почв: аллювиальные дерновые кислые и болотные (43,2% ареала произрастания), овражно-балочного комплекса (26,6%), подзолистые и дерново-подзолистые (16,1%).

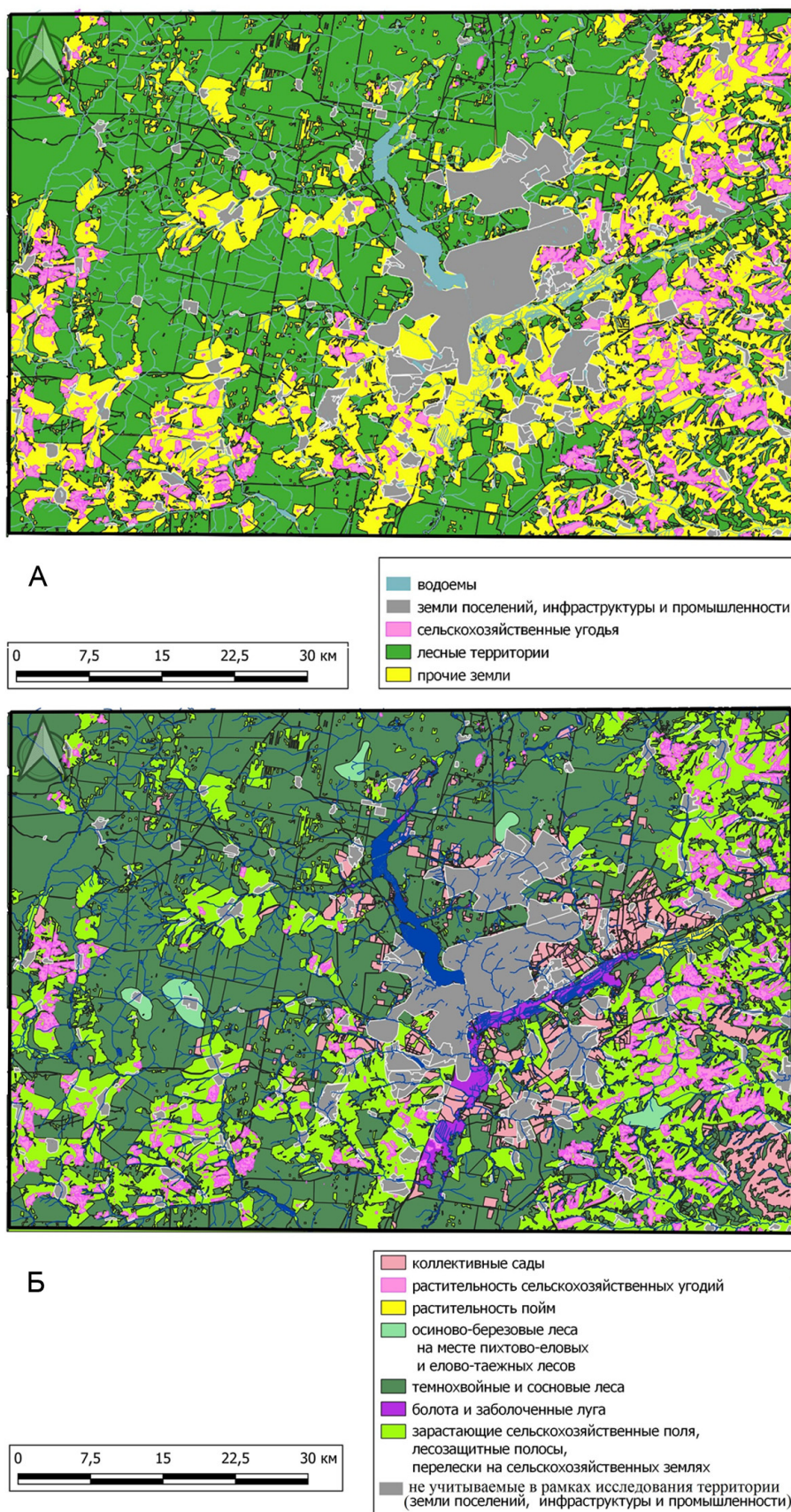


Рис. 4. Картографические данные по землепользованию и растительности территории в пределах рассматриваемой территории: А – типы землепользования; Б – растительность. *Источник:* составлено авторами статьи

Fig.4. Maps of land use and vegetation within the research area:
A – land-use types; Б – vegetation. *Source:* compiled by the authors of the article

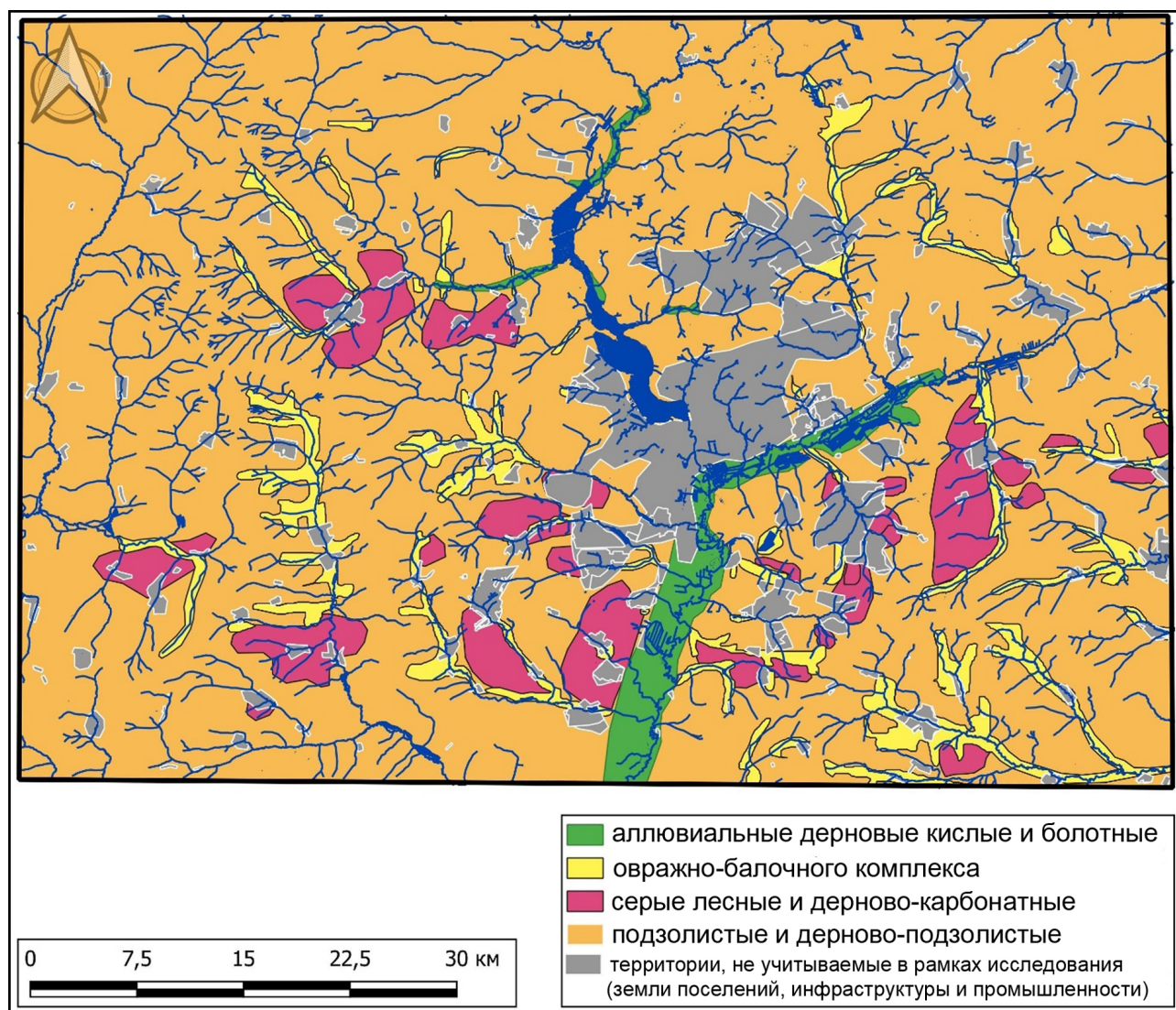


Рис. 5. Почвенная карта-схема исследуемой территории. *Источник:* составлено авторами статьи

Fig. 5. Map of soil types within the study area (author's map). *Source:* compiled by the authors of the article

Таким образом, наибольшее распространение данный вид растения получил в пределах относительно слабо задернованных участков пойм, оврагов и балок, на которых расположены аллювиальные дерновые кислые почвы, болотные почвы, дерновые слаборазвитые (смытые) склоны оврагов и дерновые делювиальные (намытые) почвы днищ балок. Анализ почвенного фонда рассматриваемой территории показал, что на данный момент борщевиком занято 1,3% площади вышеперечисленных почв. Необходимо отметить, что фактором, ограничивающим распространение борщевика Сосновского, является плотность фитоценоза. С этим связано относительно низкое распространение данного растения в пределах лесных сообществ с развитыми травянистым или травянисто-кустарничковым ярусами, произрастающих в пределах рассматриваемого участка главным образом на подзолистых и дерново-подзолистых почвах. С учетом простран-

ственной локализации крупных ареалов борщевика Сосновского (площадью 0,0025 км²) можно предположить, что в зону высокого риска активной инвазии в пределах рассматриваемого участка на данный момент попадают территории вдоль пойм рек, оврагов, балок, характеризующиеся аллювиальными дерновыми кислыми почвами, болотными почвами, смытыми и намытыми почвами оврагов и балок. Таким образом, площади территорий, подверженных высокой степени риска инвазии борщевика, составляют 315 км². В то же время прогнозные значения площади территории, характеризующейся высокой степенью риска инвазии, могут возрастать в связи с проведением в пределах лесных территорий лесорубочных работ, расчистке древесно-кустарничкового покрова в пределах просеков, линий электропередачи, полосы отвода земель вдоль дорог, выведения из использования сельскохозяйственных угодий.

ВЫВОДЫ

В ходе проведенного исследования с использованием различных вегетационных индексов была определена совокупная площадь ареалов борщевика Сосновского. Анализ показал, что площадь распространения этого вида на изучаемой территории, рассчитанная с использованием индекса *NDVI*, составила 48,41 км², при применении *CIGreen* – 56,25 км², а в случае *HSI* – 50,11 км². Для данного инвазивного вида, в отличие от других растительных сообществ, площади, полученные при анализе через комбинации индексов *NDVI*, *CIGreen* и *HSI*, оказались высоко скоррелированными.

Средняя площадь ареала борщевика Сосновского, определенная на основе обработки мультиспектрального спутникового снимка в мае 2025 г., составила 51,56 км². Абсолютное отклонение между площадями, вычисленными по материалам дистанционного зондирования Земли и сведениями наземных обследований, находилось в диапазоне от 6300 до 98 100 м², а относительное расхождение составляло от 1,2 до 10,9%.

Анализ обновленной почвенной карты выявил преобладание на изучаемой территории подзолистых и дерново-подзолистых почв (66,6%), серых лесных и дерново-карбонатных (10,3%), а также почв овражно-балочного комплекса (8,8%).

В рамках исследования установлены основные ландшафтные особенности ареалов борщевика Сосновского: наибольшая часть мест распространения этого инвазивного растения приурочена к нераспаханным пойменным территориям (56,4% от общей площади, занятой борщевиком), а также к зарастающим сельскохозяйственным угодьям (23,1%). Борщевик преимущественно встречается на аллювиальных дерновых кислых и заболоченных почвах (43,2% площади ареала), смытых и намытых почвах оврагов и балок (26,6%), подзолистых и дерново-подзолистых почвах (16,1%).

Таким образом, наибольшее распространение борщевик Сосновского получил на относительно слабо задернованных пойменных участках, оврагах и балках, где преобладают аллювиальные дерновые кислые и болотные почвы, а также дерновые слабообразованные (смытые) и дерновые делювиальные (намытые) почвы. По данным почвенного анализа на текущий момент борщевик занимает 1,3% площади вышеназванных почв, а площадь территорий, подверженных высокому риску инвазии, составляет 315 км². Высокая степень согласованности полученных результатов с данными полевых наблюдений подтверждает валидность выбранного метода и корректность используемых подходов. Полученные данные могут служить основой для принятия управленческих решений по борьбе с инвазивными видами растений.

Благодарность. Исследование выполнено при поддержке РНФ, проект № 25-27-20003 «Закономерности эволюции верхних звеньев эрозионно-русловых систем в условиях сельскохозяйственных ландшафтов Удмуртии в связи с изменением климата».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас Удмуртской Республики / под ред. И.И. Рысина. М.: Феория; Ижевск: Удмуртия, 2020. 288 с.
- Афонин А.Н., Лунова Н.Н., Ли Ю.С. и др. Эколого-географический анализ распространения и встречаемости борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi manden.*) в связи со степенью аридности территорий и его картирование для европейской территории России // Экология. 2017. № 1. С. 66–69. DOI: 10.7868/S0367059717010036.
- Богданов В.Л., Осипов А.Г., Гарманов В.В. Методика мониторинга засорения земель борщевиком Сосновского по данным дистанционного зондирования // Известия Санкт-Петербургского гос. аграрного ун-та. 2020. № 5. С. 69–74. DOI: 10.24411/2078-1318-2020-12074.
- Губко Ж.В. Определение площади расселения инвазивных видов на примере борщевика Сосновского по расчетам индексов // Сб. статей XXII научно-практического форума «Проблемы озеленения крупных городов», М.: МК-Интертрейд; Интек, 2023. С. 52–53.
- Завьяловский район: природа, история, экономика / отв. ред. Н.Г. Ильминских. Ижевск: Ижевский полиграф. комбинат, 2000. С. 43–60.
- Ильминских Н.Г. Флорогенез в условиях урбанизированной среды. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2014. С. 131–209.
- Ильминских Н.Г. Экофлора Урала и Западной Сибири (формализованные параметры видов). Ижевск: Изд-во Удмуртского ун-та, 2021. С. 8–43.
- Концепция развития космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 г. М., 2006. 77 с.
- Конюшкова М.В. Цифровое картографирование почв солонцовых комплексов Северного Прикаспия. М.: Товарищество науч. изд. КМК, 2014. 316 с.
- Кравцова В.И. Космические методы исследования почв: учеб. пособие для вузов. М.: Аспект Пресс, 2005. С. 91–142.
- Ламан Н.А., Порохов В.Н., Масловский О.М. Гигантские борщевики – опасные инвазивные виды для природных комплексов и населения Беларуси. Минск: Институт экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купровича НАН Беларуси, 2009. 40 с.
- Луков А.Н. Современное состояние и использование земельных ресурсов сухих степей и полупустынь северо-

- ро-западного Прикаспия: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М.: Российский ун-т дружбы народов, 2001. 24 с.
- Мазиков В.М. Дистанционная диагностика свойств почв и почвенного покрова: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М.: Ин-т географии РАН, 2001. 52 с.
- Петрова И.Ф., Королева Е.Г. Оценка опасности распространения борщевика Сосновского в России // Известия РАН. Серия географическая. 2022. Т. 86. № 5. С. 788–798. DOI: 10.31857/S2587556622050090.
- Письман Т.И., Ерунова М. Г., Ботвич И.Ю. и др. Информативность спектральных вегетационных индексов для оценки засоренности посевов сельскохозяйственных культур по наземным и спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2021. № 3. С. 55–66. DOI: 10.31857/S0205961421030076.
- Пономаренко А.С., Рудер В.П., Сартин С.А. и др. Изучение спектральных характеристик почвенного покрова СКО на основе данных ДЗЗ // Актуальные вопросы современной науки. 2014. № 36. С. 78–88.
- Почвенная карта Удмуртской АССР. М 1 : 200 000. М.: ГУГК СССР, 1990.
- Природопользование и геоэкология Удмуртии / под ред. В.И. Стурмана. Ижевск: Удмуртский ун-т, 2013. С. 80–96.
- Рыжиков Д.М. Контроль зон произрастания борщевика Сосновского по спектральным характеристикам отраженных волн оптического диапазона: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб.: Санкт-Петербургский гос. ун-т аэрокосмического приборостроения, 2019. 20 с.
- Савин И.Ю., Андронов Д.П., Шишконокова Е.А. и др. Детектирование борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* manden.) на основе данных съемки с беспилотного летательного аппарата // Российская сельскохозяйственная наука. 2021. № 6. С. 50–55. DOI: 10.31857/S2500262721060090.
- Солтисьяк Дж., Брей Т., Томчик М. Инвазия борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* manden.) в Коммуна Сечнице (юго-западная Польша) и перспективы ее ликвидации // Научные труды Вроцлавского ун-та естественных наук – биологии и животноводства. 2015. Т. 78. № 610. С. 73–86.
- Стурман В.И. Картографирование загрязнения окружающей среды (на примере Удмуртии): дис. ... д-ра геогр. наук. Ижевск: Удмуртский гос. ун-т, 1996. 375 с.
- Терехин Э.А. Применение различных типов спутниковых данных для анализа распространения лесной растительности на постагrogenных землях юга Среднерусской возвышенности // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг. 2024. № 10. С. 92–104. DOI: 10.25686.2024.53.76.009.
- Туганов В.В., Леконцева Л.Р., Пузырев А.Н. Ботанический обзор и история агросистем Вятско-Камского Предуралья. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2015. С. 113–127.
- Чадин И.Ф., Дальке И.В., Малышев Р.В. Оценка морозостойкости борщевика Сосновского (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) после удаления снежного покрова в ранневесенний период // Российский журнал биологических инвазий. 2018. № 4. С. 105–116.
- Шмидт И.В., Латыпова А.М., Царенко А.А. Применение данных дистанционного зондирования Земли для прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур // Региональные геосистемы. 2022. Т. 46. № 4. С. 539–554. DOI: 10.52575/2712-7443-2022-46-4-539-554.
- Bannari A., Guedona A.M., El-Hartib A. et al. Characterization of Slightly and Moderately Saline and Sodic Soils in Irrigated Agricultural Land using Simulated Data of Advanced Land Imaging (EO-1) Sensor. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2008, vol. 39, no. 19–20, p. 2795–2811, DOI: 10.1080/00103620802432717.
- Qi I., Chehbouni A., Huete A.R. et al. A modified soil adjusted vegetation index, *Remote Sens. Environ.*, 1994, vol. 48, no. 2, p. 119–126, DOI: 10.1016/0034-4257(94)90134-1.
- Электронный ресурс
Index DataBase, URL: <https://www.indexdatabase.de> (дата обращения 13.01.2026).

Поступила в редакцию 13.10.2025

После доработки 25.02.2026

Принята к публикации 21.05.2026

APPLICATION OF REMOTE SENSING METHODS FOR ASSESSING THE IMPACT OF SOIL COVER PROPERTIES ON THE SPREAD OF HOGWEED

A.V. Semakina¹, I.I. Rysin², E.A. Rubleva³, J.V. Gubko⁴

^{1,2,4} Udmurt State University, Institute of Natural Sciences, Department of Ecology and Environmental Management

³ Udmurt State University, Institute of Natural Sciences, Department of Geography, Cartography and Geoinformatics

¹ Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: alsen13@list.ru

² Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: rysin.iwan@yandex.ru

³ Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: real197@mail.ru

⁴ Post-graduate student; e-mail: zhannagreen@yandex.ru

The article presents a methodology for the regional adaptation of approaches to assess the distribution areas of Sosnowski's hogweed (*Heracleum sosnowskyi*) using remote sensing methods and taking into account the soil cover characteristics. The study was carried out within the central part of the Udmurt Republic (the

area of the analyzed territory is 3430,3 km²), where the active spread of this invasive species is recorded. The purpose of the work was to determine the area of the hogweed growth and predict the directions of its further invasion, taking into account landscape and soil conditions. To achieve this goal, the distribution areas of the species were identified based on the analysis of OLI/Landsat-8 multi-zone satellite images for the spring period of 2025. The remote sensing data was verified through field route surveys, an updated map of the soil cover of the territory was created using remote sensing data, field observation results and published cartographic materials, and the risk of active invasion was assessed for various sites, taking into account soil properties and land use features. Data processing included the calculation of vegetation indices, i.e. the normalized difference vegetation index (*NDVI*), the relative chlorophyll index (*CI_{Green}*) and the Sosnovsky hogweed index (*HSI*), followed by cartographic visualization of areas in the QGIS environment and vectorization of areas in Easy Trace. As a result of the study, the average area of the Sosnovsky hogweed range, calculated according to multispectral survey data for May 2025, was 51,56 km². The areas determined by individual indexes were: for *NDVI* – 48,41 km², for *CI_{Green}* – 56,25 km², for *HSI* – 50,11 km². The relative discrepancy between the remote sensing results and field data ranged from 1,2 to 10,9%, which confirms the validity of the chosen approach. An analysis of the spatial distribution showed that 56,4% of the total area occupied by hogweed is confined to untilled floodplain areas, and 23,1% is overgrown agricultural land. The highest occurrence of the species was noted on alluvial acidic turf and marsh soils (43,2% of the range), soils of the ravine-balka complex (26,6%) and podzolic/sod-podzolic soils (16,1%). The current share of areas occupied by hogweed among these soil varieties is 1,3%, and the area of territories with a high risk of invasion is estimated at 315 km².

Keywords: multi-zone images, Sosnovsky hogweed, vegetation indexes, soil cover, land use

Acknowledgement. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project no. 25-27-20003).

REFERENCES

- Afonin A.N., Luneva N.N., Li Yu.S. at el. Ekologo-geograficheskij analiz rasprostraneniya i vstrechaemosti borshchevika Sosnovskogo (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) v svyazi so stepen'yu aridnosti territorij i ego kartirovanie dlya evropejskoj territorii Rossii [Ecological and geographical analysis of the distribution and occurrence of Sosnovsky hogweed (*Heraczoom sosnowskyi* Manden.) in connection with the degree of aridity of territories and its mapping for the European territory of Russia], *Ekologiya*, 2017, no. 1, p. 66–69. (In Russian)
- Atlas Udmurtskoj respubliki [Atlas of the Udmurt Republic], I.I. Rysin (ed.), Moscow, Feoriya Publ., Izhevsk, Udmurtiya, 2020, p. 99. (In Russian)
- Bannari A., Guedona A.M., El-Hartib A. at el. Characterization of Slightly and Moderately Saline and Sodic Soils in Irrigated Agricultural Land using Simulated Data of Advanced Land Imaging (EO-1) Sensor, *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2008, vol. 39, no. 19–20, p. 2795–2811.
- Bogdanov V.L., Osipov A.G., Garmanov V.V. Metodika monitoringa zasoreniya zemel' borshchevikom sosnovskogo po dannym distancionnogo zondirovaniya [Methodology for monitoring land contamination by Sosnovsky hogweed using remote sensing data], *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gos. agrarnogo un-ta*, 2020, no. 5, p. 69–74. (In Russian)
- Chadin I.F., Dal'ke I.V., Malyshev R.V. Ocenka morozostojkosti borshchevika Sosnovskogo (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) posle udaleniya sneznogo pokrova v rannevesenij period [Assessment of frost resistance of Sosnowsky's hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) after removing snow cover in the early spring period], *Rossijskij zhurnal biologicheskijh invazij*, 2018, no. 4, p. 105–116. (In Russian)
- Chandra A.M., Ghosh S.K. Distancionnoe zondirovanie i geograficheskie informacionnye sistemy [Remote sensing and geographical information systems], Moscow, 2008, 307 p. (In Russian)
- Gubko Zh.V. [Determination of the area of settlement of invasive species by the example of Sosnowsky hogweed according to index calculations], *Problemy ozeleneniya krupnyh gorodov* [Problems of landscaping in large cities], Moscow, MK-Intertrade Publ., Intek Publ., 2023, p. 52–53. (In Russian)
- Il'minskih N.G. *Ekoflora Urala i Zapadnoj Sibiri (formalizovannye parametry vidov)*, Monografiya [Ecoflora of the Urals and Western Siberia (formalized parameters of species), Monograph], Izhevsk, Udmurtskij Un-t Publ., 2021, 460 p. (In Russian)
- Il'minskih N.G. *Florogenez v usloviyah urbanizirovannoj sredy* [Florogenesis in an urbanized environment], Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2014, 439 p. (In Russian)
- Koncepciya razvitiya kosmicheskoy sistemy distancionnogo zondirovaniya Zemli na period do 2025 g. [Concept for the development of the space system for remote sensing of the Earth for the period up to 2025], Moscow, 2006, 77 p. (In Russian)
- Konyushkova M.V. *Cifrovoe kartografirovanie pochv soloncovyh kompleksov Severnogo Prikaspiya* [Digital soil mapping of solonetz complexes of the Northern Caspian region], Moscow, KMK Publ., 2014, 316 p. (In Russian)
- Kravcova V.I. *Kosmicheskie metody issledovaniya pochv: uchebnoe posobie dlya VUZov* [Space methods of soil research: a textbook for universities], Moscow, Aspekt-Press Publ., 2005, 190 p. (In Russian)
- Laman N.A., Porohov V.N., Maslovskij O.M. *Gigantskie borshcheviki – opasnye invazivnye vidy dlya prirodnyh kompleksov i naseleniya Belarusi* [Giant hogweeds are dangerous invasive species for natural complexes and the population of Belarus], Minsk, 2009, 40 p. (In Russian)
- Lukov A.N. Sovremennoe sostoyanie i ispol'zovanie zemel'nyh resursov suhih stepej i polupustyn' severozapadnogo Prikaspiya [Current state and use of land resources of dry steppes and semi-deserts of the north-

- western Caspian region], *Thesis Abstract*, Moscow, 2001, 24 p. (In Russian)
- Luneva N.N., Konechnaya G.Yu., Smekalova T.N. at el. O statusе vida borshchevika Sosnovskogo (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) na territorii RF [On the status of the species Sosnowsky's hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) on the territory of the Russian Federation], *Vestnik zashchity rastenij*, 2018, 3(97), p. 10–15. (In Russian)
- Mazikov V.M. Distancionnaya diagnostika svojstv pochv i pochvennogo pokrova [Remote diagnostics of soil properties and soil cover], *Thesis Abstract*, Moscow, 2001, 52 p. (In Russian)
- Nezamov V.I., Nezamova A.V. Harakteristika kachestvennogo sostoyaniya zemel' pri kosmicheskom monitoringe zemlepol'zovaniya [Characteristics of the qualitative state of land during space monitoring of land use], *Vestnik KrasGAU*, 2011, no. 1, p. 73–79. (In Russian)
- Petrova I.F., Koroleva E.G. Ocenka opasnosti rasprostraneniya borshchevika Sosnovskogo v Rossii [Assessment of the danger of the spread of Sosnowsky's hogweed in Russia], *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*, 2022, vol. 86, no. 5, p. 788–798. (In Russian)
- Pisman T.I., Erunova M.G., Botvich I.Yu. et al. Informativnost' spektral'nyh vegetacionnyh indeksov dlya ocenki zasorennosti posevov sel'skohozyajstvennyh kul'tur po nazemnym i sputnikovym dannym [Information content of spectral vegetation indices for assessing weed infestation of crops according to ground and satellite data], *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2021, no. 3, p. 55–66. (In Russian)
- Pochvennaya karta Udmurtskoj ASSR, M 1 : 200 000* [Soil map of the Udmurt ASSR, Scale 1 : 200,000], Moscow, GUGK Publ., 1990. (In Russian)
- Ponomarenko A.S., Ruder V.P., Sartin S.A. et al. Izuchenie spektral'nyh harakteristik pochvennogo pokrova SKO na osnove dannyh DZZ [Study of spectral characteristics of the soil cover of the North Kazakhstan region based on remote sensing data], *Aktual'nye voprosy sovremennoj nauki*, 2014, no. 36, p. 78–88. (In Russian)
- Prirodopol'zovanie i geoekologiya Udmurtii: monografiya* [Nature management and geoecology of Udmurtia: monograph], V.I. Sturman (ed.), Izhevsk, Udmurtskij Un-ty Publ., 2013, 384 p. (In Russian)
- Qi I., Chehbouni A., Huete A.R. at el. A modified soil adjusted vegetation index, *Remote Sens. Environ*, 1994, vol. 48, no. 2, p. 119–126.
- Ryzhikov D.M. Kontrol' zon proizrastaniya borshchevika Sosnovskogo po spektral'nyh harakteristikam otrazhennyh voln opticheskogo diapazona [Control of growing zones of Sosnowsky's hogweed by spectral characteristics of reflected waves of the optical range], *Thesis Abstract*, St Petersburg, 2019, 20 p. (In Russian)
- Savin I.Yu., Andronov D.P., Shishkonakova E.A. at el. Detektirovanie borshchevika Sosnovskogo (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) na osnove dannyh s'emki s bespilotnogo letatel'nogo apparata [Detection of Sosnowsky's hogweed (*Heracleum sosnowskyi* Manden.) based on data from an unmanned aerial vehicle survey], *Rossiyskaya sel'skohozyajstvennaya nauka*, 2021, no. 6, p. 50–55. (In Russian)
- Shmidt I.V., Latypova A.M., Carenko A.A. Primenenie dannyh distancionnogo zondirovaniya Zemli dlya prognozirovaniya urozhajnosti sel'skohozyajstvennyh kul'tur [Application of remote sensing data for predicting crop yields], *Regional'nye geosistemy*, 2022, vol. 46, no. 4, p. 539–554. (In Russian)
- Sturman V.I. *Kartografirovaniye zagryazneniya okruzhayushchej sredy (na primere Udmurtii)* [Mapping of environmental pollution (on the example of Udmurtia)], Dissertation, Izhevsk, 1996, 375 p. (In Russian)
- Terekhin E.A. Primenenie razlichnyh tipov sputnikovyyh dannyh dlya analiza rasprostraneniya lesnoj rastitel'nosti na postagrogennyh zemlyah yuga Srednerusskoj vozvyshenosti [Application of various types of satellite data for the analysis of the distribution of forest vegetation on post-agrogenic lands of the south of the Central Russian Upland], *Lesnye ekosistemy v usloviyah izmeneniya klimata*, 2024, no. 10, p. 92–104. (In Russian)
- Tuganaev V.V., Lekonceva L.R., Puzyrev A.N. *Botanicheskij obzor i istoriya agrosistem Vyatsko-Kamskogo Predural'ya* [Botanical review and history of agrosystems of the Vyatka-Kama Cis-Urals], Moscow, Izhevsk, IKI Publ., 2015, 192 p. (In Russian)
- Zav'yalovskij rajon: priroda, istoriya, ekonomika* [Zavyalovsky district: nature, history, economy], N.G. Il'minskih (ed.), Izhevsk, IPK Publ., 2001, 366 p. (In Russian)

Web source

Index DataBase, URL: <https://www.indexdatabase.de> (access date 13.01.2026).

Received 13.10.2025

Revised 25.02.2026

Accepted 21.05.2026