

УДК 630*587.6

А. А. Пушкин, В. В. Коцан, П. В. Севрук, О. С. Ожич
Белорусский государственный технологический университет

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ДЕШИФРИРОВАНИЕ ПОВРЕЖДЕННЫХ
ХВОЙНЫХ НАСАЖДЕНИЙ ПО РАЗНОВРЕМЕННЫМ МАТЕРИАЛАМ
КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ**

В статье описан алгоритм определения поврежденных хвойных насаждений на основании обработки разновременных космических снимков спутника Sentinel. Алгоритм разработан по результатам анализа динамики спектрального индекса SWVI (Short-Wave Vegetation Index) в поврежденных хвойных древостоях. Объектом исследований являются сосновые и еловые древостои с коэффициентом участия в составе от пяти единиц, произрастающие на территории Минского ГПЛХО. Все древостои разделены на 6 учетных категорий. Разработанный алгоритм строится на проверке следующих условий: насколько отличается значение индекса исследуемого участка от среднего значения категории, какая разница значений индекса исследуемого участка анализируемого и предыдущего месяца, каково отношение разностей средних значений индексов учетной категории и исследуемого участка в анализируемом месяце к этим же показателям в прошлом месяце. Полевая проверка результатов, полученных с использованием разработанного алгоритма, показывает высокую точность обнаружения поврежденных хвойных древостоев. Использование инструментов, позволяющих получать актуальную информацию о наличии повреждений в лесном фонде на основе автоматизированной обработки оперативно поступающих материалов космической съемки, существенно облегчает работу по мониторингу состояния лесов и помогает минимизировать потери древесины.

Ключевые слова: дешифрирование, хвойные насаждения, спектральные индексы, разновременные данные дистанционного зондирования Земли, коэффициент состава, усыхания, буреломные и ветровальные повреждения, геоинформационная система.

Для цитирования: Пушкин А. А., Коцан В. В., Севрук П. В., Ожич О. С. Автоматизированное дешифрирование поврежденных хвойных насаждений по разновременным материалам космической съемки // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2025. № 2 (294). С. 20–28.

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-294-3.

A. A. Pushkin, V. V. Kotsan, P. V. Sevruck, O. S. Ozhich
Belarusian State Technological University

**AUTOMATED INTERPRETATION OF DAMAGED CONIFEROUS STANDS
BASED ON MULTI-TEMPORAL SATELLITE IMAGERY**

The article presents an algorithm for detecting damaged coniferous stands based on the processing of multi-temporal satellite imagery from the Sentinel satellite. The algorithm was developed through an analysis of the dynamics of the Short-Wave Vegetation Index (SWVI) in affected coniferous stands. The study focuses on pine and spruce stands with a participation coefficient of at least five units, located within the territory of the Minsk Forestry. All stands are classified into 6 accounting categories. The proposed algorithm is based on the evaluation of the following conditions: the deviation of the index value of the investigated area from the mean index value within its category, the difference in index values for the investigated area between the analyzed month and the preceding month, and the ratio of the difference between the mean category index and the investigated area's in the analyzed month to the to the same indicators in the previous month. Field validation of the results obtained using the proposed algorithm demonstrated a high level of accuracy in detecting damaged coniferous stands. The implementation of tools that enable real-time detection of forest damage through automated processing of satellite imagery is expected to significantly enhance forest condition monitoring and contribute to minimizing timber losses.

Keywords: image interpretation, coniferous stands, spectral indices, multi-temporal remote sensing data, participation coefficient, forest stand dieback, windthrow and windbreak damage, Geographic Information System (GIS).

For citation: Pushkin A. A., Kotsan V. V., Sevruck P. V., Ozhich O. S. Automated interpretation of damaged coniferous stands based on multi-temporal satellite imagery. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2025, no. 2 (294), pp. 20–28 (In Russian). DOI: 10.52065/2519-402X-2025-294-3.

Введение. В современных условиях лесное хозяйство сталкивается с серьезными вызовами, обусловленными глобальными климатическими и экологическими изменениями [1, 2], которые приводят к снижению устойчивости лесных экосистем. Согласно данным Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь, вследствие произошедших на территории только Гомельской области летом 2024 г. неблагоприятных погодных условий было повреждено 5 000 000 м³ древесины [3]. Наличие методик и инструментов, позволяющих получать актуальную информацию о поврежденных лесных насаждениях на основе автоматизированной обработки оперативно поступающих материалов космической съемки, существенно облегчит работу по мониторингу состояния лесов и недопущению потерь древесины.

Для создания инструментов, предназначенных выявлять поврежденные хвойные насаждения по данным космической съемки, был проведен ряд исследований, целью которых была оценка информативности различных спектральных индексов и методов математической обработки создаваемых тематических карт, а также полевые обследования поврежденных лесных участков [4–6]. Результатом исследований стал алгоритм выявления повреждений хвойных лесов на основании спектрального индекса SWVI (Short-Wave Vegetation Index) [7, 8], рассчитанного по разновременным данным спутников Sentinel [9, 10]. Анализ значений индекса и его динамики производится по сетке квадратов размером 30×30 м, наложенной на земли лесного фонда, находящиеся в ведении Минского ГПЛХО [11]. Разработка алгоритма и проведение экспериментальных расчетов осуществлялись в геоинформационной системе QGIS [12].

Основная часть. Интенсивность усыхания и повреждения лесных насаждений тесно связана с их лесоводственно-таксационными показателями. Например, молодняки обычно более устойчивы к повреждениям, чем спелые древостои. Предыдущие исследования показали, что состав насаждения, особенно доля участия главной породы в составе древостоя, оказывает существенное влияние на биологическую устойчивость хвойных лесов и интенсивность их усыхания [13, 14]. Кроме того, доля главной породы

является ключевым фактором, определяющим динамику спектрального индекса SWVI, рассчитанного по данным Sentinel для хвойных насаждений на разных стадиях усыхания. На основе этих данных и статистического анализа [15] разработана шкала классификации хвойных лесов, позволяющая выделять категории для оценки повреждений в зависимости от доли хвойной породы в составе насаждения (таблица).

Для каждой из категорий, представленных в таблице, динамика изменения спектральных индексов в процессе усыхания уникальна. Поэтому оценивать, является ли данный участок насаждения (квадрат) усыхающим, необходимо отдельно в пределах каждой категории.

Алгоритм определения поврежденных хвойных насаждений состоит из последовательности операций, представленных на рис. 1 в виде функциональной схемы, и включает нижеследующие основные этапы.

1. Определение среднего арифметического значения индекса SWVI для каждой ячейки (30×30 м) сетки на дату анализируемого месяца выполняется по следующей формуле:

$$\overline{SWVI}_m = \frac{\sum SWVI_{m_i}}{n_{ja}}, \quad (1)$$

где $\overline{SWVI}_m$ – среднее арифметическое значение индекса SWVI ячейки сетки в анализируемый месяц; $\sum SWVI_{m_i}$ – сумма значений индекса SWVI всех пикселей в ячейке сетки в анализируемый месяц; n_{ja} – количество пикселей, попавших в ячейку, шт.

2. Определение среднего значения индекса SWVI для каждой учетной категории на дату анализируемого месяца выполняется по формуле

$$\overline{SWVI}_{m_{sr}} = \frac{\sum SWVI_{m_i}}{n_{kat}}, \quad (2)$$

где $\overline{SWVI}_{m_{sr}}$ – среднее арифметическое значение индекса SWVI учетной категории; $\sum SWVI_{m_i}$ – сумма значений индекса SWVI всех пикселей в учетной категории; n_{kat} – количество пикселей в учетной категории, шт.

Учетные категории оценки повреждений

Название категории	Таксационная характеристика насаждения
Категория 1	Древостой с участием в составе 10–9 единиц сосны
Категория 2	Древостой с участием в составе 8–7 единиц сосны
Категория 3	Древостой с участием в составе 6–5 единиц сосны
Категория 4	Древостой с участием в составе 10–9 единиц ели
Категория 5	Древостой с участием в составе 8–7 единиц ели
Категория 6	Древостой с участием в составе 6–5 единиц ели

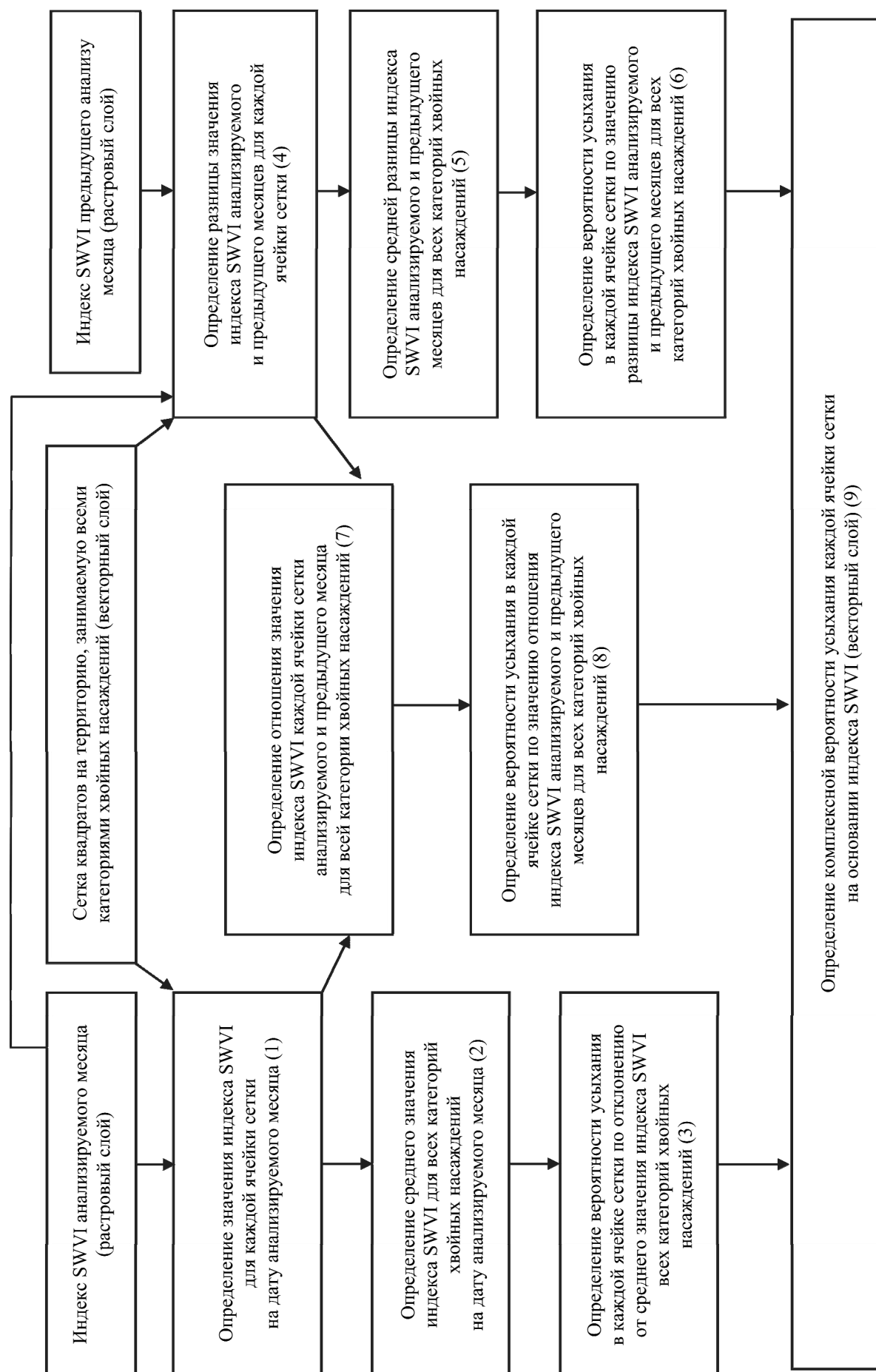


Рис. 1. Функциональная схема алгоритма определения поврежденных хвойных насаждений

3. Определение среднеквадратического отклонения среднего значения индекса SWVI ячейки от среднего значения категории на дату анализируемого месяца.

Среднеквадратическое отклонение индекса SWVI для учетной категории определяется по формуле

$$\sigma_{\text{SWVI}_m} = \sqrt{\frac{\sum \text{SWVI}_{m_i}^2 \frac{(\sum \text{SWVI}_{m_i})^2}{n_{\text{kat}}}}{n_{\text{kat}} - 1}}, \quad (3)$$

где σ_{SWVI_m} – среднеквадратическое отклонение индекса SWVI для учетной категории; $\sum \text{SWVI}_{m_i}$ – сумма значений индекса SWVI всех пикселей учетной категории на дату анализируемого месяца.

Определение значения спектрального индекса SWVI, соответствующего границе первой вероятности повреждения, выполняется по формуле

$$\text{SWVI}_{gr1} = \overline{\text{SWVI}_{m_{sr}}} - \sigma_{\text{SWVI}_m}, \quad (4)$$

где SWVI_{gr1} – значение спектрального индекса SWVI, соответствующего границе первой вероятности повреждения.

Если значение спектрального индекса ячейки меньше границы первой вероятности повреждения, то ячейка принимает значение «первая вероятность повреждения присутствует»:

$$\begin{aligned} &\text{если } \overline{\text{SWVI}_m} < \text{SWVI}_{gr1}, \\ &\text{то } \text{POV}_1 = 1. \end{aligned} \quad (5)$$

Если значение спектрального индекса ячейки больше или равно границе первой вероятности повреждения, то ячейка принимает значение «первая вероятность повреждения отсутствует»:

$$\begin{aligned} &\text{если } \overline{\text{SWVI}_m} \geq \text{SWVI}_{gr1}, \\ &\text{то } \text{POV}_1 = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

4. Определение разницы значений индексов SWVI для каждого пикселя на дату анализируемого и предыдущего месяцев:

$$\Delta \text{SWVI}_i = \text{SWVI}_{m_i} - \text{SWVI}_{m-1_i}, \quad (7)$$

где ΔSWVI_i – разница значений индексов SWVI для каждого пикселя на дату анализируемого и предыдущего месяцев.

Определение среднего арифметического значения индекса SWVI для каждой ячейки сетки на дату предыдущего месяца:

$$\overline{\text{SWVI}_{m-1}} = \frac{\sum \text{SWVI}_{m-1_i}}{n_{ja}}, \quad (8)$$

где $\overline{\text{SWVI}_{m-1}}$ – среднее значение индекса SWVI для ячейки сетки на дату предыдущего месяца; $\sum \text{SWVI}_{m-1_i}$ – сумма значений индекса SWVI всех пикселей в ячейке сетки на дату предыдущего месяца.

5. Определение среднего значения разницы индексов SWVI для ячейки на дату анализируемого и предыдущего месяцев:

$$\overline{\Delta \text{SWVI}_{ja}} = \frac{\sum \Delta \text{SWVI}_i}{n_{ja}}, \quad (9)$$

где $\overline{\Delta \text{SWVI}_{ja}}$ – расчетное среднее значение разницы индексов SWVI для ячейки на дату анализируемого и предыдущего месяцев; $\sum \Delta \text{SWVI}_i$ – сумма разниц значений индексов SWVI для каждого пикселя ячейки на дату анализируемого и предыдущего месяцев.

Определение среднего значения разницы индексов SWVI для учетной категории на дату анализируемого и предыдущего месяцев:

$$\overline{\Delta \text{SWVI}_{sr}} = \frac{\sum \Delta \text{SWVI}_i}{n_{\text{kat}}}, \quad (10)$$

где $\overline{\Delta \text{SWVI}_{sr}}$ – расчетное среднее значение разницы индексов SWVI для категории на дату анализируемого и предыдущего месяцев; $\sum \Delta \text{SWVI}_i$ – сумма разниц значений индексов SWVI для каждого пикселя учетной категории на дату анализируемого и предыдущего месяцев.

6. Определение среднеквадратического отклонения разницы индексов SWVI на дату анализируемого и предыдущего месяцев для учетной категории:

$$\sigma_{\Delta \text{SWVI}} = \sqrt{\frac{\sum \Delta \text{SWVI}_i^2 - \frac{(\sum \Delta \text{SWVI}_i)^2}{n_{ja}}}{n_{ja} - 1}}, \quad (11)$$

где $\sigma_{\Delta \text{SWVI}}$ – среднеквадратическое отклонение разницы индексов SWVI на дату анализируемого и предыдущего месяцев для учетной категории; $\sum \Delta \text{SWVI}_i$ – сумма значений разниц индексов SWVI на дату анализируемого и предыдущего месяцев для всех пикселей учетной категории.

Определение значения спектрального индекса SWVI, соответствующего границе второй вероятности повреждения:

$$SWVI_{gr2} = \overline{\Delta SWVI}_{sr} + \sigma_{\Delta SWVI}, \quad (12)$$

где $SWVI_{gr2}$ – значение спектрального индекса SWVI, соответствующего границе второй вероятности повреждения.

Если разница для ячейки больше величины границы второй вероятности повреждения, то ячейка принимает значение «вторая вероятность повреждения присутствует», т. е.

$$\begin{aligned} \text{если } \overline{\Delta SWVI}_{ja} > SWVI_{gr2}, \\ \text{то } POV_2 = 1. \end{aligned} \quad (13)$$

Если значение ячейки меньше или равно границе второй вероятности повреждения, то ячейка принимает значение «вторая вероятность повреждения отсутствует»:

$$\begin{aligned} \text{если } \overline{\Delta SWVI}_{ja} \leq SWVI_{gr2}, \\ \text{то } POV_2 = 0. \end{aligned} \quad (14)$$

7. Определение отношения разности значений индексов SWVI для учетной категории и ячейки на дату анализируемого месяца к разности значений этих показателей на дату прошлого месяца:

$$SWVI_{rel} = \frac{\overline{SWVI}_{m_{sr}} - \overline{SWVI}_m}{\overline{SWVI}_{m-1_{sr}} - \overline{SWVI}_{m-1}}, \quad (15)$$

где $SWVI_{rel}$ – отношение разности значений индексов SWVI для учетной категории и ячейки на дату анализируемого месяца к разности значений этих показателей на дату прошлого месяца.

8. Сопоставление вычисленного отношения разностей спектрального индекса (формула (15)) с граничными значениями в разрезе учетных категорий.

Если вычисленное по формуле (15) отношение разностей спектрального индекса SWVI находится в определенном диапазоне значений, полученном на основании анализа данных полевых исследований, то ячейка принимает значение «третья вероятность повреждения присутствует»:

$$\begin{aligned} \text{если } x < SWVI_{rel} < y, \\ \text{то } POV_3 = 1, \end{aligned} \quad (16)$$

где x, y – соответственно минимальное и максимальное значения отношения разности значений индексов SWVI для учетной категории и ячейки на дату анализируемого месяца к разности значений этих показателей на дату прошлого месяца.

В противном случае ячейка принимает значение «третья вероятность повреждения отсутствует»:

$$\begin{aligned} \text{если } x > SWVI_{rel} > y, \\ \text{то } POV_3 = 0. \end{aligned} \quad (17)$$

9. Определение комплексной вероятности повреждения лесных насаждений для каждой ячейки сетки на основании индекса SWVI.

Если первая, вторая и третья вероятности повреждения принимают значение 1, то данная ячейка сетки относится к поврежденным, т. е.

$$\begin{aligned} \text{если } POV_1 + POV_2 + POV_3 = 3, \\ \text{то } POV = 1. \end{aligned} \quad (18)$$

В обратном случае данная ячейка сетки относится к неповрежденным:

$$\begin{aligned} \text{если } POV_1 + POV_2 + POV_3 < 3, \\ \text{то } POV = 0. \end{aligned} \quad (19)$$

Таким образом, в соответствии с изложенным алгоритмом устанавливается возможное наличие повреждений насаждений для каждой анализируемой ячейки.

На основе представленного выше алгоритма на платформе геоинформационной системы QGIS выполнена разработка программных средств «Определение участков поврежденных лесных насаждений», автоматизирующих выполнение вышепредставленных вычислений.

Для опытной проверки результатов, получаемых при использовании представленного выше алгоритма, были проведены полевые натурные обследования выявленных мест повреждений хвойных лесных насаждений. В качестве объектов полевых исследований на основании равномерной представленности всех учетных категорий и размещения в центральной части объекта исследования (Минского ГПЛХО) были выбраны Червенский и Смолевичский лесхозы. Обнаружение мест потенциальных повреждений на местности проводилось на основании подготовленных в QGIS проектов и загруженных в полевой планшет LT 700 с мощным GNSS-приемником, позволяющим проводить измерения в лесу с точностью около 1 м.

Первый этап проведенных полевых обследований (июль 2024 г.) показал неудовлетворительные результаты работы программных средств: из 38 выделенных программным компонентом древостоев только 5 относились к поврежденным. В эту выборку наряду с повреждениями попали свежие сплошнолесосечные рубки и места проведения рубок ухода (рис. 2, 3). Смена зеленой массы крон на порубочные остатки при сплошнолесосечных рубках, а также наличие сухого хвороста и мелкотоварной древесины после проведения рубок ухода существенно

снизили значение индекса SWVI по сравнению с прошлым месяцем, что привело к выделению данных насаждений как в категорию поврежденных.

Также ошибочно вместо повреждений были обнаружены насаждения с низкой полнотой. В таких древостоях из-за низкой сомкнутости полога на значение индекса SWVI значительно повлиял напочвенный покров, а также тени от отдельных деревьев, возникающие из-за их редкого размещения по площади. К тому же в разные месяцы съемки может отличаться состояние живого напочвенного покрова из-за происходящих в нем процессов вегетации, а также в зависимости от погодных условий и времени проведения съемки будет различным положение теней. В итоге данные участки алгоритм идентифицировал как участки повреждений лесных насаждений.

На основании проведенного анализа ошибочных и точных поврежденных хвойных лесных насаждений используемый программными средствами алгоритм обнаружения повреждений был усовершенствован. В частности, введено условие, по которому анализировалось отношение разности значений индексов SWVI для учетной категории и ячейки на дату анализиру-

емого месяца к разности значений этих показателей в прошлом месяце. Данный подход позволил заменить анализ абсолютных значений индекса на анализ его отклонений от средней величины, которые менее вариабельны и более устойчивы к воздействию внешней среды.

Таким образом, полученные в результате проведенных полевых обследований результаты использовались в процессе усовершенствования вычислительного алгоритма поиска поврежденных лесных насаждений.

Обследуемая территория была проанализирована на основании усовершенствованного алгоритма в августе 2024 г. и тогда же проведен второй этап полевых изысканий. Из 36 участков, обозначенных программным компонентом как повреждения, были подтверждены 35, а на одном был выявлен еловый древостой с низкой полнотой.

На рис. 4, 5 представлены примеры обнаруженных поврежденных сосновых и еловых древостоев. Усыхания имели сплошной характер и требуют проведения сплошных санитарных рубок. Некоторые (3 шт.) обследованные участки имели следы частичного повреждения и нуждались в проведении выборочных санитарных рубок.



Рис. 2. Обнаруженные сплошнолесосечные вырубки



Рис. 3. Обнаруженные места проведения рубок ухода



Рис. 4. Обнаруженный усохший сосновый древостой



Рис. 5. Обнаруженный усохший еловый древостой

Заключение. Проведенная опытная проверка функций показала высокую точность обнаружения участков поврежденных хвойных лесных насаждений (97%), что свидетельствует о работоспособности системы и возможности ее использования в практике лесного хозяйства. Некоторые из найденных участков уже были обнаружены работниками лесохозяйственных

учреждений и отведены в рубку, что только подчеркивает эффективность разработанной системы.

На последующих этапах разработки и опытной эксплуатации представленного алгоритма предусматривается его проверка на большом количестве экспериментального материала, собранного на территории Минского ГПЛХО.

Список литературы

1. Экологоориентированное развитие лесного хозяйства Беларуси в условиях климатических изменений / И. В. Войтов [и др.]; под общ. ред. И. В. Войтова, В. Г. Шатравко. Минск: БГТУ, 2019. 200 с.
2. Багинский В. Ф., Лапицкая О. В. Комплексная оценка лесных ресурсов: учеб. пособие. Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2022. 151 с.
3. Лесхозы приближаются к заготовке 5 млн кубометров буреломной древесины // СБ. Беларусь сегодня. URL: <https://www.sb.by/articles/leskhozy-priblizhayutsya-k-zagotovke-5-mln-kubometrov-burelomnoy-drevesiny.html> (дата обращения: 03.03.2025).
4. Давидович Ю. С., Катковский Л. В. Спектральные индексы для изучения усыханий хвойной растительности // ГИС-технологии в науках о Земле: материалы респ. науч.-практ. семинара студентов и молодых ученых, Минск, 18 нояб. 2020 г. Минск, 2020. С. 157–161. URL: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/254330> (дата обращения: 03.03.2025).
5. Мартинов А. О. Классификация состояний усыхания ели обыкновенной на основе спектров отражения // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2022. № 3. С. 26–38. DOI: 10.33581/2520-2243-2022-3-26-38.
6. Ковалев А. В. Анализ устойчивости лесных насаждений к повреждениям сибирским шелкопрядом по данным дистанционного зондирования // Сибирский лесной журнал. 2021. № 5. С. 71–78.
7. Гусев А. П. Индикация изменений в природно-антропогенных ландшафтах по многолетней динамике вегетационных индексов (на примере юго-востока Беларуси) // Современные направления развития физической географии: научные и образовательные аспекты в целях устойчивого развития: материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 85-летию фак. географии и геоинформатики Белорус. гос. ун-та и 65-летию Белорус. геогр. о-ва, Минск, 13–15 нояб. 2019 г. Минск, 2019. С. 67–69. URL: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/234865> (дата обращения: 04.03.2025).

8. Гусев А. П., Козюлев И. И., Шаврин И. А. Использование спектральных индексов для оценки эродированности почв в природно-антропогенных ландшафтах Беларуси // Российский журнал прикладной экологии. 2020. № 2. С. 48–52. URL: https://www.researchgate.net/publication/343290461_ispolzovanie_spektralnyh_indeksov_dla_ocenki_erodirovannosti_pocv_v_prirodno-antropogennyh_landsaftah_bielarusi (дата обращения: 04.03.2025).

9. Sentinel Hub. URL: <https://www.sentinel-hub.com/> (дата обращения: 05.03.2025).

10. Vega VV05 Launch Updates – Sentinel-2A // Internet Archive. Wayback Machine. URL: <https://web.archive.org/web/20170202043912/http://www.spaceflight101.net/vega-vv05-launch-updates---sentinel-2a.html> (дата обращения: 05.03.2025).

11. Лесхозы объединения // Минское государственное производственное лесохозяйственное объединение. URL: <https://mplho.by/leshozi-obedineniya> (дата обращения: 05.03.2025).

12. QGIS. URL: <https://qgis.org/> (дата обращения: 05.03.2025).

13. Динамика спектрального индекса NDVI усыхающих хвойных насаждений / А. А. Пушкин [и др.] // Лесное хозяйство: материалы 88-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 24 янв. – 16 фев. 2024 г. Минск, 2024. С. 404–406. URL: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/65703> (дата обращения: 05.03.2025).

14. Концепция создания и перспективные функции геосервиса мониторинга состояния лесов / А. А. Пушкин [и др.] // Лесное хозяйство: материалы 88-й науч.-техн. конф. проф.-преподават. состава, науч. сотрудников и аспирантов, Минск, 24 янв. – 16 фев. 2024 г. Минск, 2024. С. 397–400. URL: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/65706> (дата обращения: 05.03.2025).

15. Бондаренко А. С., Жигунов А. В. Статистическая обработка материалов лесоводственных исследований: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 125 с.

References

1. Voytov I. V., Shatravko V. G., Yurevich N. N., Lednitsky A. V., Neverov A. V., Nosnikov V. V., Rozhkov L. N. *Ekologooriyentirovannoye razvitiye lesnogo khozyaystva Belarusi v usloviyakh klimaticheskikh izmeneniy* [Ecologically oriented development of forestry in Belarus in the context of climate change]. Minsk, BGТУ Publ., 2019. 200 p. (In Russian).

2. Baginsky V. F., Lapitskaya O. V. *Kompleksnaya otsenka lesnykh resursov: uchebnoye posobiye* [Integrated forest resources assessment]. Gomel, GGU imeni F. Skoriny Publ., 2022. 151 p. (In Russian).

3. Forestry enterprises are approaching the harvesting of 5 million cubic meters of windfall timber. Available at: <https://www.sb.by/articles/leskhozy-priblizhayutsya-k-zagotovke-5-mln-kubometrov-burelomnoy-drevesiny.html> (accessed 03.03.2025) (In Russian).

4. Davidovich Yu. S., Katkovsky L. V. Spectral indices for studying the drying out of coniferous vegetation. *GIS-tekhnologii v naukakh o Zemle: materialy respublikanskogo nauchno-prakticheskogo seminara studentov i molodykh uchenykh* [GIS technologies in Earth sciences: materials of the republic scientific and practical seminar of students and young scientists]. Minsk, 2020, pp. 157–161. Available at: <https://elib.bsu.by/handle/123456789/254330> (accessed 03.03.2025) (In Russian).

5. Martinov A. O. Classification of norway spruce drying states on the basis of reflection spectra. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Fizika* [Journal of the Belarusian State University. Physics], 2022, no. 3, pp. 26–38. DOI: 10.33581/2520-2243-2022-3-26-38 (In Russian).

6. Kovalev A. V. Analysis of forest stands resistance to siberian silkmoth attack according to remote sensing data. *Sibirskiy lesnoy zhurnal* [Siberian forestry journal], 2021, no. 5, pp. 71–78 (In Russian).

7. Gusev A. P. Indication of changes in natural-anthropogenic landscapes by the long-term dynamics of vegetation indices (the example of south-eastern Belarus). *Sovremennyye napravleniya razvitiya fizicheskoy geografii: nauchnyye i obrazovatel'nyye aspekty v tselyakh ustoychivogo razvitiya: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 85-letiyu fakul'teta geografii i geoinformatiki Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta i 65-letiyu Belorusskogo geograficheskogo obshchestvava* [Modern directions of development of physical geography: scientific and educational aspects for sustainable development: materials of the International scientific and practical conference dedicated to the 85th anniversary of the faculty of geography and geoinformatics of the Belarusian State University and the 65th anniversary of the Belarusian geographical societies]. Minsk, 2019, pp. 67–69. Available at: <http://elib.bsu.by/handle/123456789/234865> (accessed 04.03.2025) (In Russian).

8. Gusev A. P., Kozulev I. I., Shavrin I. A. The use of spectral indices for assessing soil erosion in natural and anthropogenic landscapes of Belarus. *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii* [Russian journal of applied ecology], 2020, no. 2, pp. 48–52. Available at: https://www.researchgate.net/publication/343290461_ispolzovanie_spektralnyh_indeksov_dla_ocenki_erodirovannosti_pocv_v_prirodno-antropogennyh_landsaftah_bielarusi (accessed 04.03.2025) (In Russian).

9. Sentinel Hub. Available at: <https://www.sentinel-hub.com/> (accessed 05.03.2025).
10. Vega VV05 Launch Updates – Sentinel-2A. Available at: <https://web.archive.org/web/20170202043912/http://www.spaceflight101.net/vega-vv05-launch-updates---sentinel-2a.html> (accessed 05.03.2025).
11. Forestry associations. Available at: <https://mplho.by/leshozi-obedineniya> (accessed 05.03.2025) (In Russian).
12. QGIS. Available at: <https://qgis.org/> (accessed 05.03.2025).
13. Pushkin A. A., Sevruck P. V., Kotsan V. V., Ozhich O. S., Ilyuchik M. A. Dynamics of the spectral index NDVI of drying coniferous stands. *Lesnoye khozyaystvo: materialy 88-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* [Forestry: proceedings of the 88th scientific and technical conference of faculty, researchers and PhD students]. Minsk, 2024, pp. 404–406. Available at: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/65703> (accessed 05.03.2025) (In Russian).
14. Pushkin A. A., Kotsan V. V., Tsai S. S., Sidelnik N. Ya., Kovalevsky S. V., Ilyuchik M. A. The concept of creation and promising functions of a geoservice for monitoring forest conditions. *Lesnoye khozyaystvo: materialy 88-y nauchno-tekhnicheskoy konferentsii professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnykh sotrudnikov i aspirantov* [Forestry: proceedings of the 88th scientific and technical conference of faculty, researchers and PhD students]. Minsk, 2024, pp. 397–400. Available at: <https://elib.belstu.by/handle/123456789/65706> (accessed 05.03.2025) (In Russian).
15. Bondarenko A. S., Zhigunov A. V. *Statisticheskaya obrabotka materialov lesovodstvennykh issledovaniy* [Statistical processing of forestry research materials]. Saint Petersburg, Politekhnikheskiy universitet Publ., 2016. 125 p. (In Russian).

Информация об авторах

Пушкин Андрей Александрович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: pushkin@belstu.by

Коцан Владимир Васильевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: Wolodia250@belstu.by

Севрук Павел Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: sevruckpv@belstu.by

Ожич Ольга Светославовна – кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: bakhur@belstu.by

Information about the authors

Pushkin Andrey Aleksandrovich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Head of the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pushkin@belstu.by

Kotsan Vladimir Vasil'evich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Wolodia250@belstu.by

Sevruck Pavel Vladimirovich – PhD (Agriculture), Senior Lecturer, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sevruckpv@belstu.by

Ozhich Ol'ga Svetoslavovna – PhD (Agriculture), Senior Lecturer, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bakhur@belstu.by

Поступила 15.03.2025