

Научная статья

Original article

УДК 630*182.21

DOI 10.55186/25880209_2026_10_1_5

**КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СУКЦЕССИОННОЙ ДИНАМИКИ ЛЕСНЫХ
ФИТОЦЕНОЗОВ (НА ПРИМЕРЕ ВОРОНЕЖСКОГО КАРБОНОВОГО
ПОЛИГОНА «FOR&ST CARBON»)**

A COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF SUCCESSIONAL DYNAMICS IN
FOREST PLANT COMMUNITIES (CASE STUDY OF THE VORONEZH
«FOR&ST CARBON» POLYGON)



Парахневич Татьяна Михайловна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры экологии, защиты леса и лесного охотоведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова» (394087 Россия, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7815-3785>, e-mail: tatyana.1701@mail.ru

Кирик Андрей Игоревич, кандидат биологических наук, доцент кафедры ботаники и дендрологии ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова» (394087 Россия, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7576-0085>, e-mail: umacsvrn@mail.ru

Парахневич Андрей Игоревич, аспирант кафедры экологии, защиты леса и лесного охотоведения ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова» (394087 Россия, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 8), e-mail: dotgod17@yandex.ru

Tatiana M. Parakhnevich, candidate of agriculture sciences, associate professor of the Department of Ecology, forest protection and forest hunting, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation (394087 Russia, Voronezh, st. Timiryazeva, 8), ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7815-3785>, e-mail: tatyana.1701@mail.ru

Andrey I. Kirik, candidate of biological sciences, associate professor of the Department of Botany and Dendrology, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation (394087 Russia, Voronezh, st. Timiryazeva, 8), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7576-0085>, e-mail: umacsvrn@mail.ru

Andrey I. Parakhnevich, PhD student of the Department of Ecology, forest protection and forest hunting, Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov», Voronezh, Russian Federation (394087 Russia, Voronezh, st. Timiryazeva, 8), e-mail: dotgod17@yandex.ru

Аннотация. В условиях климатических изменений мониторинг состояния лесных фитоценозов, как ключевых депонирующих углерод экосистем, приобретает особую актуальность. В данной статье, для изучения сукцессионного состояния сосновых лесов на карбоновом полигоне Воронежской области, предложен гибридный метод, интегрирующий классические геоботанические показатели и данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В основе метода лежит количественная оценка устойчивости сообществ на основе комплекса параметров: видового богатства, проективного покрытия и возраста эдификатора (*Pinus sylvestris*), соотношения эколого-ценотических групп видов и распределения значений вегетационного индекса (NDVI) на пробных площадях. Анализ показал, что устойчивость

фитоценозов не определяется максимальными или минимальными значениями какого-либо отдельного фактора, а носит комплексный характер. Результаты подтверждают, что для адекватной оценки и прогнозирования устойчивости лесных экосистем, необходимы многопараметрические подходы. Традиционные геоботанические модели сохраняют фундаментальную ценность, однако их дополнение данными ДЗЗ существенно расширяет аналитические возможности. Такая интеграция позволяет проводить более объективную дифференциацию сообществ и строить более точные прогнозы их сукцессионной динамики, что имеет ключевое значение для планирования лесовосстановительных мероприятий и оценки состояния лесных экосистем.

Abstract. Under the conditions of climate change, monitoring the state of forest plant communities, as key carbon-depositing ecosystems, becomes especially relevant. This article proposes a hybrid method, integrating classical geobotanical indicators and remote sensing data, to study the successional state of pine forests in the carbon polygon of the Voronezh region. The method is based on a quantitative assessment of community stability using a set of parameters: species richness, projective cover and age of the dominant (*Pinus sylvestris*), the ratio of ecological-cenotic species groups, and the distribution of vegetation index (NDVI) values across the net of permanent plots. The analysis revealed that the stability of forest ecosystems is not determined by the maximum or minimum values of any single factor but is of a complex nature. The results confirm that multiparameter approaches are necessary for an adequate assessment and prediction of forest ecosystem stability. Traditional geobotanical models retain fundamental value; however, supplementing them with remote sensing data significantly expands analytical capabilities. Such integration enables a more objective differentiation of communities and the construction of more accurate forecasts of their successional dynamics, which is crucial for planning reforestation measures and assessing the state of forest ecosystems.

Ключевые слова: сукцессия, динамика, растительный покров, лесные сообщества, комплексная оценка, дистанционное зондирование Земли.

Keywords: succession, dynamics, vegetation cover, forest communities, comprehensive assessment, remote sensing.

В контексте изучения последствий климатических изменений мониторинг состояния лесных фитоценозов приобретает первостепенное значение. Это связано со способностью лесных экосистем к депонированию значительных объёмов углерода, что особенно важно для контроля уровня парникового эффекта. В настоящее время мониторинг состояния растительного покрова проводится, как с использованием классических методов геоботаники [1, 7], так и с применением современных методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), интеграции машинного обучения и искусственного интеллекта [2, 8]. Особое внимание уделяется разработкам методик оценки нарушений растительного покрова и динамики естественного и искусственного лесовосстановления [4, 10]. Несмотря на прогресс в технологиях ДЗЗ, исследование локальных, относительно небольших по площади нарушений и скорости восстановления растительного покрова, по-прежнему остаётся сложной задачей для мониторинга [6].

При изучении фиторазнообразия карбонового полигона для оценки сукцессионного состояния лесных фитоценозов был разработан гибридный метод, включающий сопряженный анализ геоботанических показателей и данных дистанционного зондирования. Градация сообществ на основе количественной оценки скорости сукцессионной динамики является важнейшим параметром для прогнозирования устойчивости лесных экосистем и эффективности лесовосстановления.

Сеть постоянных пробных площадей (ППП) карбонового полигона – участки площадью от 0,25 до 1 га, расположенные в разнообразных растительных сообществах, характерных для Воронежской области. Для оценки сукцессионной динамики сосновых лесов карбонового полигона были выбраны 5 ППП, которые можно условно разделить на 2 типа. Посадки сосны возрастом

более 100 лет (ППП 1-3), которые можно отнести к позднесукцессионным сообществам; пионерные молодые посадки (ППП 4-5), заложенные после пожаров 2010 г. в рамках проведения лесовосстановительных мероприятий.

На ППП учитывались следующие параметры:

1. Видовое богатство (результаты учёта обнаруженных видов растений на ППП).
2. Проективное покрытие *Pinus sylvestris* (средние значения, полученные на пробных площадках).
3. Возраст *Pinus sylvestris* (данные таксационной характеристики).
4. Отношение процента видов из эколого-ценотической группы хвойных лесов (бореальные, сухо-боровые, свеже-боровые) к проценту видов из лугово-степных сообществ (степные, сухих и влажных лугов) [3].
5. Распределение значений индекса NDVI по территории ППП, выраженное в процентах, спутниковые снимки обработаны в LandViewer (EOS Data Analytics) [5]. Это стандартный показатель для оценки фотосинтетической активности и биомассы растительного покрова. Рассчитывается по данным дистанционного зондирования в красном (Red, R) и ближнем инфракрасном (Near-Infrared Red, NIR) каналах по формуле:

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)},$$

где NIR и R — значения спектральной яркости (или коэффициента отражения) в соответствующих диапазонах длин волн [9].

Поскольку NDVI использовался, как один из показателей оценки сукцессионных изменений, выбирался день вегетационного сезона, когда индекс достигал пиковых значений. Для его определения использовался инструмент «Анализ временных рядов» (рис. 1).

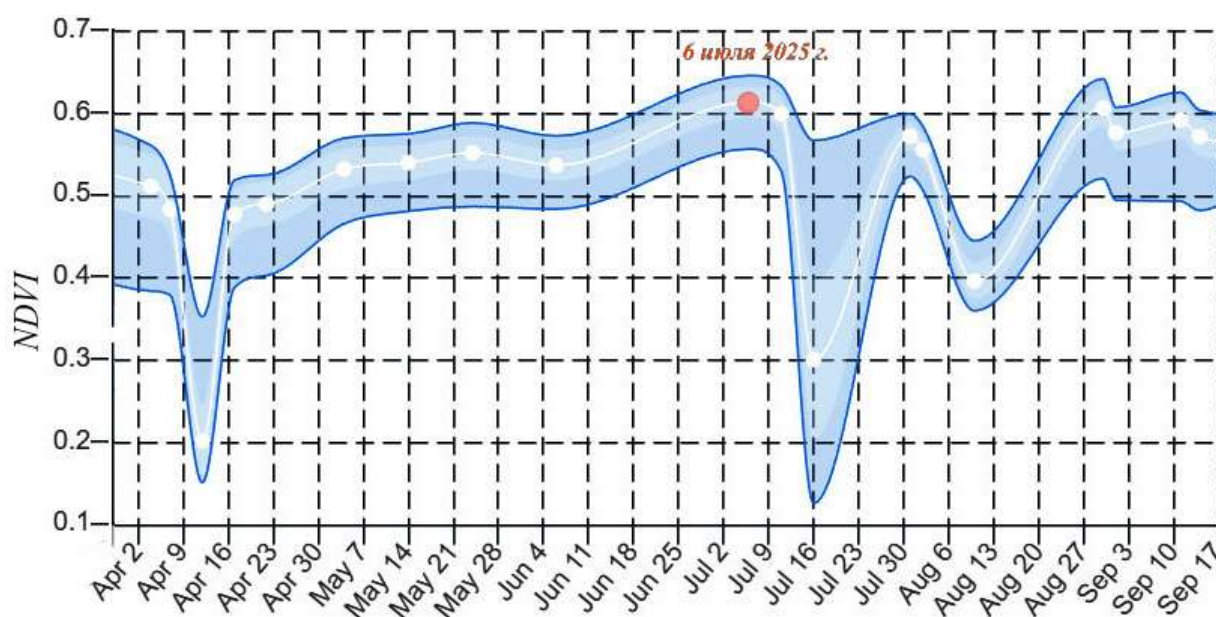


Рисунок 1 - Динамика NDVI на ППП 1-5 с апреля по середину сентября 2025 г.

Как следует из приведённого графика, максимальное значение индекса зафиксировано 6 июля 2025 г. Использовались спутниковые снимки, сделанные именно в этот день.

Для построения интегральных оценок, объединяющих разнородные признаки с разными единицами измерения, исходные данные были подвергнуты предварительному нормированию. Все значения были приведены к безразмерному диапазону от 0 до 1 с использованием процедуры min-max нормализации, что обеспечило их сопоставимость в дальнейших расчётах.

Картосхемы спутниковых снимков ППП, расположенных в сосновых лесах, приводятся на рисунках 2, 3. На рисунке 2 объединены ППП, которые представлены насаждениями сосны возрастом более 100 лет. Основной фон рисунков свидетельствует о значительной фотосинтетической активности, характерной для зрелых лесных сообществ. На рисунке 3 представлены картосхемы сосновых насаждений в возрасте менее 15 лет, в которых сосна ещё не приобрела эдификаторную роль и преобладают травянистые растения.

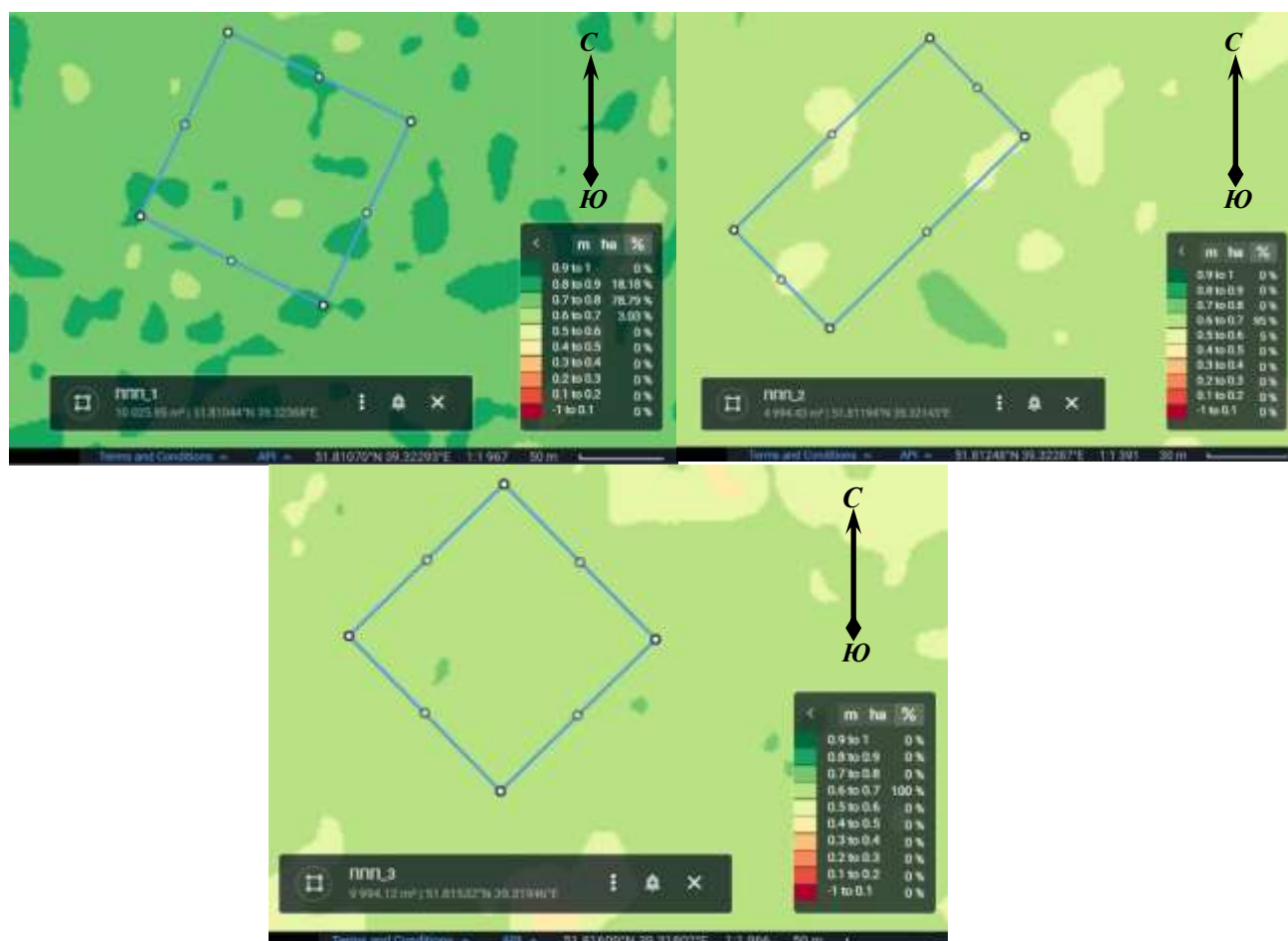


Рисунок 2 – Картосхема процентного распределение индекса NDVI на территории ППП 1-3 (данные: Sentinel-2 L2A, 06 июля 2025 г.; платформа: LandViewer (EOSDA))

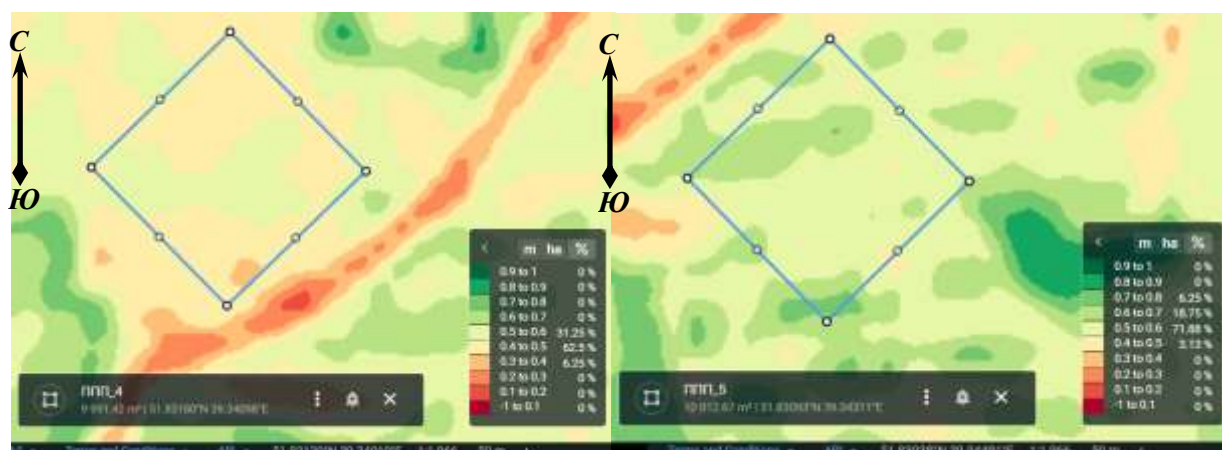


Рисунок 3 – Картосхема процентного распределение индекса NDVI на территории ППП 4-5 (данные: Sentinel-2 L2A, 06 июля 2025 г.; платформа: LandViewer (EOSDA))

Представленные на рисунках данные объединены в таблице 1.

Таблица 1 – Процентное соотношение площадей с различными значениями NDVI на территории ППП 1-5

| Значения NDVI | Расшифровка значений | Процентное соотношение значений NDVI на постоянных пробных площадях | | | | |
|------------------------------|--|---|------|-----|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 0,8-0,9 | Максимальная биомасса и фотосинтетическая активность | 18,18 | — | — | — | — |
| 0,7-0,8 | | 78,79 | — | — | — | 6,25 |
| 0,6-0,7 | Высокопродуктивные экосистемы | 3,03 | 95 | 100 | — | 18,75 |
| 0,5-0,6 | Плотная, высокопродуктивная растительность | — | 5 | — | 31,25 | 71,88 |
| 0,4-0,5 | Очень густая, зрелая растительность | — | — | — | 62,5 | 3,13 |
| 0,3-0,4 | Густая, развивающаяся растительность | — | — | — | 6,25 | — |
| Средневзвешенный индекс NDVI | | 76,51 | 64,5 | 65 | 47,51 | 57,82 |

Примечание – Средневзвешенный индекс NDVI – сумма произведений среднего значения диапазона индекса на процент занимаемой площади

Анализ данных таблицы подтверждает визуально отмеченные особенности растительных сообществ. Как и предполагалось, в зрелых многолетних сообществах значения вегетативного индекса существенно выше, чем в молодых посадках сосны (ППП 4, 5).

Градация сообществ на основе количественной оценки скорости сукцессионной динамики включала объединение разнородных по единицам измерения данных. С целью проведения сравнительного анализа они были нормированы в диапазоне от 0 до 1.

Итоговые результаты вычислений представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Исходные и нормированные значения показателей
сукцессионной динамики на ППП 1-5

| № п/п | Показатель | Исходные/нормированные значения на постоянных пробных площадях | | | | |
|------------------------------|---|---|-------------------|------------------|-------------------|--------------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1. | Видовое богатство | 35/ <i>I</i> | 24/ <i>0</i> | 29/ <i>0,46</i> | 24/ <i>0</i> | 30/ <i>0,55</i> |
| 2. | Проективное покрытие <i>Pinus sylvestris</i> , % | 45/ <i>0,6</i> | 55/ <i>I</i> | 38/ <i>0,321</i> | 30/ <i>0</i> | 46/ <i>0,64</i> |
| 3. | Возраст <i>Pinus sylvestris</i> , г. | 142/ <i>I</i> | 107/ <i>0,73</i> | 113/ <i>0,77</i> | 14/ <i>0</i> | 14/ <i>0</i> |
| 4. | Отношение процента видов из ЭЦГ* хвойных лесов (Br, PnF, PnD) к проценту видов из лугово-степных сообществ (MDr, MFr, St) | 1,08/ <i>0</i> | 1,83/ <i>0,53</i> | 2,5/ <i>I</i> | 1,45/ <i>0,26</i> | 1,25/ <i>0,12</i> |
| 5. | Средневзвешенный индекс NDVI | 76,51/ <i>I</i> | 64,5/ <i>0,48</i> | 65/ <i>0,5</i> | 47,51/ <i>0</i> | 57,82/ <i>0,04</i> |
| Сумма нормированных значений | | 3,6 | 2,74 | 3,05 | 0,26 | 1,35 |

* - названия эколого-ценотических групп: 1. Br – бореальная. 2. PnD — сухо-боровая. 3. MDr — сухих лугов. 4. MFr — свежих лугов. 5. St — степная. 6. PnF — свеже-боровая

Анализ данных, представленных в таблице, показывает интересную особенность. Комплексный характер расчёта устойчивости растительных сообществ не содержит предикторов в виде экстремальных значений какого-либо из анализируемых факторов – будь то видовое богатство, проективное покрытие сосны, возраст эдификатора или значения NDVI.

Наиболее сбалансированную и, следовательно, устойчивую структуру фитоценоза демонстрирует пробная площадь №1. Она имеет максимальное значение суммы по изученным показателям. Это очевидный вывод для ППП №1-3, однако, их градацию можно провести только по комплексу признаков. Постоянные пробные площади №4-5 демонстрируют значительно меньшую стабильность. Оценку этого отставания также невозможно провести по какому-либо одному-двум параметрам. Оно не кратно разнице в возрасте сосны, показатель видового богатства этих сообществ (часто используемый

мониторинговый параметр) также не является надёжным индикатором стабильности.

Распределение пробных площадей сосновых фитоценозов карбонового полигона, отражающее их положение вдоль градиента от менее к более стабильным, близким к субклимаксовым состояниям, показано на рисунке 4.

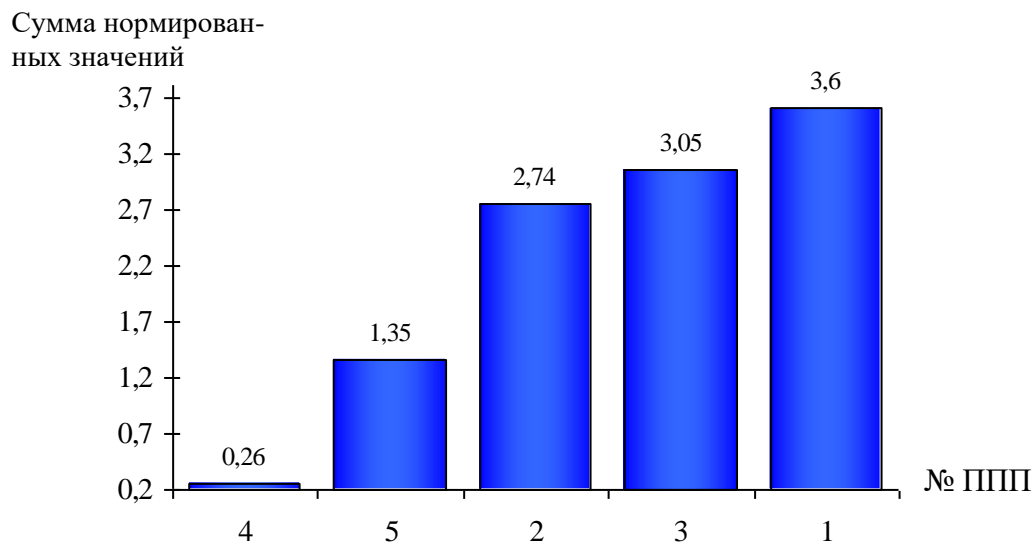


Рисунок 4 – Распределение ППП 1-5 сосновых фитоценозов карбонового полигона по градиенту роста стабильности сообщества

Представленная на рисунке 4 диаграмма визуализирует интегральный эффект влияния различных переменных на уровень стабильности фитоценозов. В перспективе рост нормированных показателей молодых сосняков будет определяться не только увеличением эдификаторного влияния сосны в ходе прохождения онтогенеза, но и параметрами среды: структурой окружающего растительного покрова и скоростью формирования биомассы (по данным NDVI).

Таким образом, полученные результаты подтверждают необходимость применения комплексных, многопараметрических подходов для адекватной оценки и прогнозирования устойчивости лесных экосистем. Простые модели, основанные на анализе данных геоботанических описаний, сохраняют свою ценность и остаются фундаментальными, т.к. развитие концепции

сукцессионной динамики строилось именно на этих параметрах. Однако дополнение этого подхода данными дистанционного зондирования Земли открывает новые перспективы и расширяет аналитические возможности. Интеграция этих данных предоставляет расширенный набор индикаторов для объективной оценки текущего состояния фитоценозов и построения более точных прогнозов их сукцессионной динамики.

Литература

1. Герасимова Т.А., Яковлев А.А. Оценка видового разнообразия растительного покрова в постпирогенных насаждениях, сформировавшихся на старопахотных землях в Ленинградской области // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2023. С. 405-407.
2. Сафонова А.Н. Методы машинного обучения при обработке изображений сверхвысокого пространственного разрешения на примере задач классификации растительности: дис. канд. техн. наук: 05.13.17; Сибирский федеральный университет, 2020. 104 с.
3. Флора сосудистых растений Центральной России [Электронный ресурс]: интернет-база данных / авт. проекта к.б.н. Л.Г. Ханина (ИМПБ РАН); рук. д.б.н. Л.Б. Заугольнова (ЦЭПЛ РАН); сост. списка видов Е.М. Глухова (ИМПБ РАН). – Электрон. дан. – Москва: Институт математических проблем биологии РАН, 2004. – Режим доступа: <https://www.impb.ru/eco/index.php> (дата обращения: 12.01.2026).
4. Avetisyan, D., Velizarova, E. & Filchev, L. (2022). Post-fire forest vegetation state monitoring through satellite remote sensing and in situ data. Remote Sensing, Vol. 14, no 24, pp. 6266.
5. EOS Data Analytics (2023). LandViewer [An interactive online platform for satellite data analysis]. - URL: <https://eos.com/landviewer/> (date of access: 12.01.2026).

6. Hwang, K., Harpold, A., Tague, C. et al. (2023). Seeing the disturbed forest for the trees: Remote sensing is underutilized to quantify critical zone response to unprecedented disturbance. *Earth's Future*, Vol. 11, no 8, pp. e2022EF003314.
7. Midolo G., Herben, T., Axmanova, I., Marceno, C., Pätsch, R., Bruelheide, H. & Chytry, M. (2023). Disturbance indicator values for European plants. *Global Ecology and Biogeography*, Vol. 32, no 1, pp. 24-34.
8. Pandey, P.C. & Arellano, P. (2022). Advances in remote sensing for forest monitoring. John Wiley & Sons Ltd, 400 p.
9. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. & Deering, D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA. Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp, Vol. 1, pp. 309-317.
10. Senf, C. & Seidl, R. (2022). Post-disturbance canopy recovery and the resilience of Europe's forests. *Global Ecology and Biogeography*, Vol. 31, no 1, pp. 25-36.

References

1. Gerasimova, T.A. & Yakovlev, A.A. (2023). Assessment of species diversity of vegetation in post-pyrogenic stands formed on old-arable lands in the Leningrad Region. *Forests of Russia: policy, industry, science, education: Proceedings of the VIII All-Russian scientific and technical conference*. St. Petersburg: SPbGLTU, pp. 405-407.
2. Safonova, A.N. (2020). Machine learning methods for processing ultra-high spatial resolution images using vegetation classification problems as an example: Cand. Sci. (Eng.) Dissertation: 05.13.17; Siberian Federal University, pp. 104.
3. Flora of vascular plants of Central Russia [Electronic resource]: Internet database / author of the project, PhD in biology L.G. Khanina (IMPB RAS); supervisor: Dr. Sc. (Biology) L.B. Zaugolnova (CEPL RAS); compiler of the species list E.M. Glukhova (IMPB RAS). – Electronic data. – Moscow: Institute of

Mathematical Problems of Biology RAS, 2004. – Access mode: <https://www.impb.ru/eco/index.php> (date of access: 12.01.2026).

4. Avetisyan, D., Velizarova, E. & Filchev, L. (2022). Post-fire forest vegetation state monitoring through satellite remote sensing and in situ data. Remote Sensing, Vol. 14, no 24, pp. 6266.

5. EOS Data Analytics (2023). LandViewer [An interactive online platform for satellite data analysis]. - URL: <https://eos.com/landviewer/> (date of access: 12.01.2026).

6. Hwang, K., Harpold, A., Tague, C. et al. (2023). Seeing the disturbed forest for the trees: Remote sensing is underutilized to quantify critical zone response to unprecedented disturbance. Earth's Future, Vol. 11, no 8, pp. e2022EF003314.

7. Midolo G., Herben, T., Axmanova, I., Marceno, C., Pätsch, R., Bruelheide, H. & Chytrý, M. (2023). Disturbance indicator values for European plants. Global Ecology and Biogeography, Vol. 32, no 1, pp. 24-34.

8. Pandey, P.C. & Arellano, P. (2022). Advances in remote sensing for forest monitoring. John Wiley & Sons Ltd, 400 p.

9. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. & Deering, D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA. Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp, Vol. 1, pp. 309-317.

10. Senf, C. & Seidl, R. (2022). Post-disturbance canopy recovery and the resilience of Europe's forests. Global Ecology and Biogeography, Vol. 31, no 1, pp. 25-36.

© Парахневич Т.М., Кирик А.И., Парахневич А.И., 2026. *International agricultural journal*, 2026, № 1, 84-96.

Для цитирования: Парахневич Т.М., Кирик А.И., Парахневич А.И. КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СУКЦЕССИОННОЙ ДИНАМИКИ ЛЕСНЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ (НА ПРИМЕРЕ ВОРОНЕЖСКОГО КАРБОНОВОГО ПОЛИГОНА «FOR&ST CARBON») // *International agricultural journal*. 2026. № 1, 84-96.