

<https://doi.org/10.25686/foreco.2024.88.25.003>

УДК 630 181:528.8

РОЛЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ ВЛИЯНИЙ НА ИЗМЕНЕНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ СТАРООСВОЕННЫХ РАЙОНОВ ЕВРОПЕЙСКОЙ РОССИИ

В.В. Елсаков, Т.А. Мыльникова, В.М. Щанов
Институт биологии Коми НЦ УрО РАН (ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН)

Выполнен анализ изменений лесопокрываемых территорий пяти административных районов Костромского Заволжья по материалам спутниковой съемки Landsat (1985-2018 гг.) и MODIS (2000-2023 гг.). По классификации 2018 г. леса покрывают 83,4% всей площади рассмотренных районов Костромской области (в 1985 г. показатель составлял 72,5%). Доля мало измененных лесных территорий (на изображениях 1985 и 2018 гг. пиксели отнесены к одному классу) составила 26,2% для лиственных лесов и 25,9% для хвойных (всего 57,1%). Данные метеорологических наблюдений станции «Кострома» демонстрируют рост показателей приземной температуры воздуха для большинства декад года для периода с 1987 г. С 1975 г. отмечено снижение количества выпадающих осадков. Анализ изменений рассчитанного индекса IVCI (англ. Integral Vegetation Condition Index) по материалам съемки MODIS позволил визуализировать тренды роста продуктивности лесопокрываемых территорий с 2000 г. Начало наблюдений связано с преобладанием наиболее низких показателей (2000-2005 гг.), постепенным увеличением амплитуды варьирования и формированием суммарного тренда в направлении роста показателя (2006-2009 гг.) и постепенным переходом в область устойчивых значений, превышающих средние величины (2013-2023 гг.). Доля хвойных лесов находящихся в области продуктивных показателей в 2000 г. составляла 3,5% лесопокрываемой территории, в 2023 г. – 61,8%. Анализ связи индекса с показателями приземной температуры воздуха (ПТВ) демонстрирует наличие значимой положительной коррелятивной связи с показателями средней температуры июня (хвойные $r^2 = 0,72$, $p = 0,0001$, лиственные $r^2 = 0,67$, $p = 0,0004$).

Ключевые слова: старовозрастные леса, спутниковые методы исследований, климатические изменения продуктивности, спектральный индекс IVCI.

THE ROLE OF CLIMATIC INFLUENCES ON FOREST VEGETATION PRODUCTIVITY CHANGES IN EUROPEAN RUSSIAN OLD-DEVELOPED AREAS

V.V. Elsakov, T. A. Mylnikova, V. M. Shchanov
Institute of Biology of Komi SC UB RAS (IB FRC Komi SC UB RAS)

The analysis of changes in forested areas of five administrative districts of the Kostroma Volga region based on Landsat satellite imagery (1985-2018) and MODIS (2000-2023) has been carried out. According to the 2018 classification, forests cover 83.4% of the total area of the considered districts of the Kostroma region (in 1985 the indicator was 72.5%). The share of little-altered forest areas (pixels are assigned to the same class in the 1985 and 2018 images) was 26.2% for deciduous forests and 25.9% for coniferous forests (57.1% in total). Data of meteorological observations of Kostroma station show an increase in surface air temperature indices for most decades of the year for the period since 1987. Since 1975, a decrease in precipitation was noted. The analysis of changes in the calculated IVCI (Integral Vegetation Condition Index) based on MODIS imagery data allowed visualizing the trends of productivity growth in forested areas since 2000. The beginning of observations is associated with the prevalence of the lowest values (2000-2005), gradual increase in the amplitude of variation and formation of a cumulative trend in the direction of growth of the index (2006-2009), and gradual transition to the area of stable values exceeding the average values (2013-2023). The share of coniferous forests in the area of productive indices in 2000 was 3.5% of the forest area, in 2023 it will be

61.8%. The analysis of the relationship between the index and PTV shows a significant positive correlation with the mean June temperature (conifers $r^2 = 0.72$, $p = 0.0001$, deciduous $r^2 = 0.67$, $p = 0.0004$).

Key words: old-growth forests, satellite research methods, climatic changes in productivity, IVCI spectral index.

Введение

Изменения характеристик лесных сообществ, связанные с климатическими трансформациями последних десятилетий, отчётливо фиксируются на северных границах распространения лесной растительности, на участках экотонных зон в связи с расширением ареала древесных пород (Kharuk, 2022; Григорьев и др., 2019). Поэтому вызывает интерес анализ лесопокрываемых регионов, расположенных в более оптимальных для развития лесных пород условиях, где трансформация метеорологических показателей наблюдается, но в меньшей степени, чем северных. Восстановление и сукцессионные изменения лесных сообществ регионов центральной России, в силу их раннего хозяйственного использования, выступают в качестве маскирующего фона. Использование разногодных спутниковых изображений в сочетании с методами статистического анализа позволяет дать оценку трансформации лесных сообществ с нивелированием факторов раннего хозяйственного влияния.

Цель настоящего исследования направлена на анализ климатогенных изменений лесного покрова ряда районов Костромской области с использованием материалов спутниковых съёмок Landsat и MODIS.

Материалы и методика исследований

Изменения продуктивности лесопокрываемых территорий центральной части Костромского Заволжья выполнены для пяти административных районов Костромской области (рис. 1). Территория относится к южно-таёжному району европейской части Российской Федерации (<https://docs.cntd.ru/document/420224339>). Леса региона с XVIII века до 1917 года относились к категории казённых дач (заказные корабельные рощи междуречья Унжи и Ветлуги). Этот район уникален для Европейской части России, так как только здесь «реализуется экологически контрастное сочетание дуба и его неморальной свиты с сообществами лиственницы и пихты» (<https://kologrivskiy-les.ru/flora-zapovednika>). Для территории участка выполнена подготовка двух тематических карт распределения доминирующих классов земной поверхности и растительного покрова на основании спутниковых съёмов с 30-летним временным интервалом — Landsat 4-5 TM и Landsat 8 OLI — для одного периода вегетации (08.08.1985 и 10.08.2018).

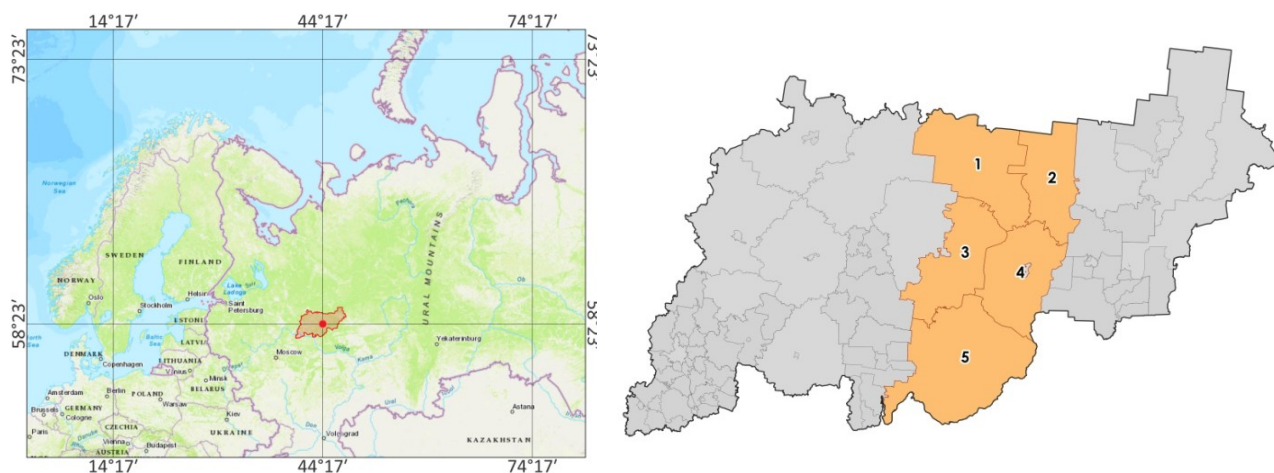


Рис. 1. Районы выполненных работ.

Цветом отмечены модельные районы: 1 – Кологривский (3,5 тыс. км²), 2 – Межевский (2,2 тыс. км²), 3 – Нейский (2,2 тыс. км²), 4 – Мантуровский (2,7 тыс. км²), 5 – Макарьевский (4,8 тыс. км²)

Методами пороговых правил выделены семь классов, имеющих значимое статистическое разделение. В работе использованы только участки с классами, сохраняющими свою принадлежность как в 1985 г., так и в 2018 г. (рис. 2а). К таким территориям отнесено 57,1% площади. Основные массивы сохранившихся лиственных лесов (26,2%) отмечены в северной части рассмотренной территории, хвойных (25,9%) — в менее освоенной южной. Для выявления трендов изменений продуктивности участков с лесным покровом привлекали временные серии спутниковых сцен сенсоров MODIS (MOD13Q1, источник данных: <https://earthexplorer.usgs.gov>) интервала 2000–2023 гг. с рассчитанными спектральными индексами EVI (Enhanced Vegetation Index). Пространственное разрешение пикселя MODIS ниже, чем у Landsat (250 м у MODIS и 30 м у Landsat), поэтому для анализа использовали только те элементы изображения MODIS, для которых более 80% покрытия относится к одному классу по Landsat. Для съёмки MODIS лесопокрываемые территории, удовлетворяющие таким условиям, составили 12,2% (от общей площади территории) для хвойных и 9,4% для лиственных лесов (рис. 2б).

Для вегетационного периода каждого года отбирали только максимальные показатели индекса, по которым рассчитывали суммарный линейный тренд изменений. В связи со значительными колебаниями показателей между разными годами для визуализации хода многолетней изменчивости состояния растительности использовался индекс IVCI (англ. Integral Vegetation Condition Index — интегральный индекс условий вегетации) (Шинкаренко, Барталёв, 2022), аналог индекса VCI (Liu, Kogan, 1996) с заменой сезонных значений одного вегетационного сезона на годовые

$$IVCI_i = \frac{(EVI_i - EVI_{min})}{(EVI_{max} - EVI_{min})} \quad (1)$$

где EVI_i — значение EVI в текущем году; EVI_{min} и EVI_{max} — минимальные и максимальные значения показателя за весь период исследований (2000–2023 гг.).

Анализ климатических характеристик периода 1936–2023 гг. проведен по материалам архивов Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации «ВНИИГМИ-МЦД» (<http://meteo.ru>) и данными фактических наблюдений за состоянием погоды (<https://rp5.ru>) по метеостанции (м/ст) «Кострома». Среди

метеорологических элементов использовали показатель приземной температуры воздуха (ПТВ, °C) и количество выпавших осадков (мм). Для анализа территориальных различий в отклонениях температуры от усредненных величин периода 1960-2022 гг. рассчитывали средние декадные величины (среднее за декаду).

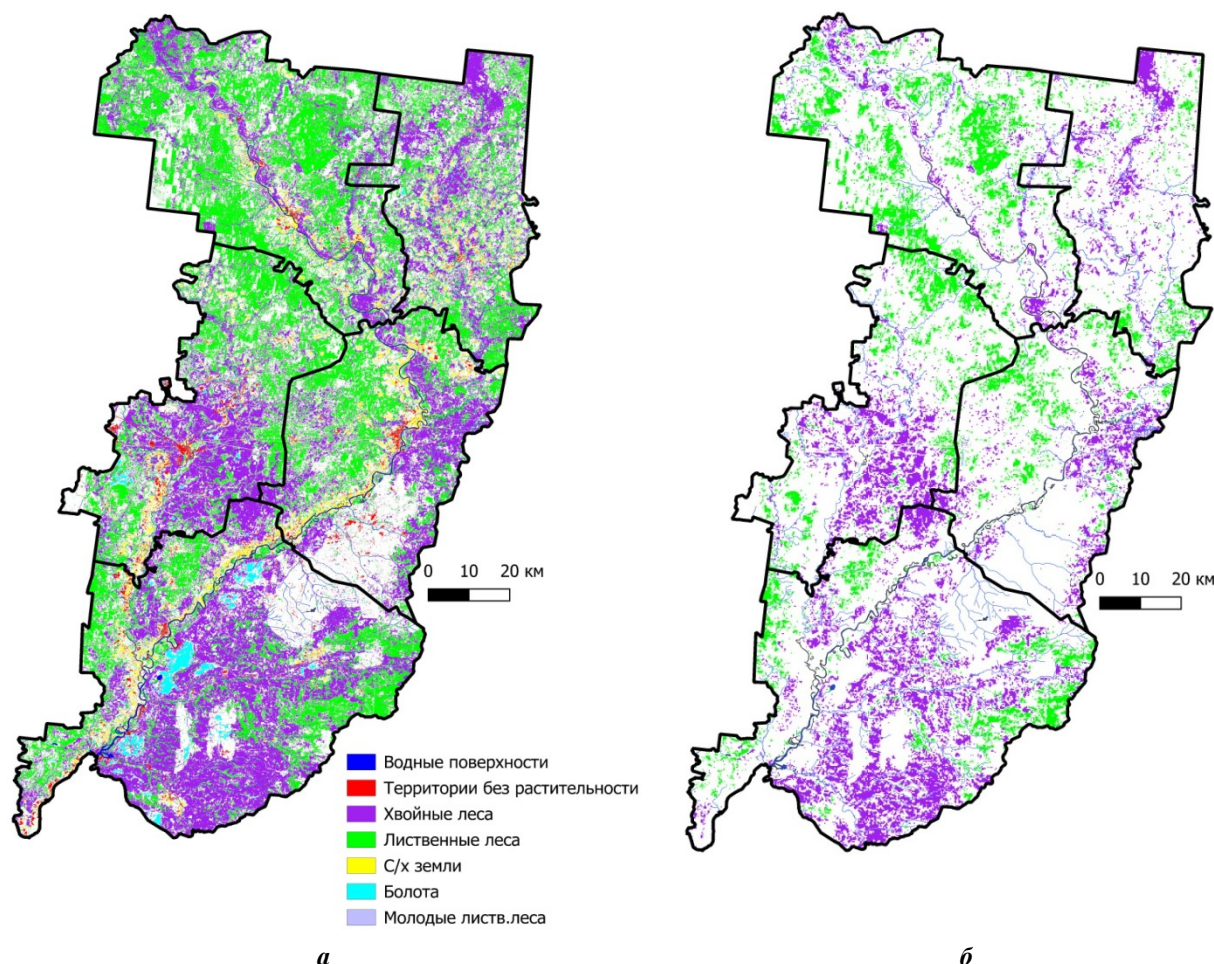


Рис. 2. Выделенные классы растительного покрова, сохраняющие принадлежность на классификациях снимков Landsat 1985 и 2018 гг. (а), и выделенные на их основе однородные пиксели по MODIS (более 80% относятся к одному классу) для хвойных и лиственных лесов (б)

Результаты исследования

Диапазон значений среднегодовой ПТВ за период инструментальных измерений 1925-2023 гг. по м/ст «Кострома» изменялся от -0,3 °C в 1941 г. до -6,2 °C в 2020 г. С 1987 г. отмечен постоянный рост показателя ПТВ с выпадением отдельных лет (рис. 3а). Основное влияние на рост среднегодовых температур ПТВ оказывал рост отрицательных (FDD, Freezing Degree Days, °C-суток), а не положительных температур воздуха (TDD, Degree Days Thaw, °C-суток), что находит отражение в более существенных отклонениях декадных величин от средних показателей для периодов январь-март и ноябрь-декабрь. На протяжении фазы роста величин температуры отмечены несколько фаз снижения показателя в период июнь-июль 2003-2004 гг. и 2017-2018 гг. Для территории характерно снижение количества выпавших осадков с 1975 г., преимущественно за счёт снижения количества выпавших осадков в снежный период, рост жидких осадков отмечен для июля 2008 г. и 2023 г. (рис. 3б).

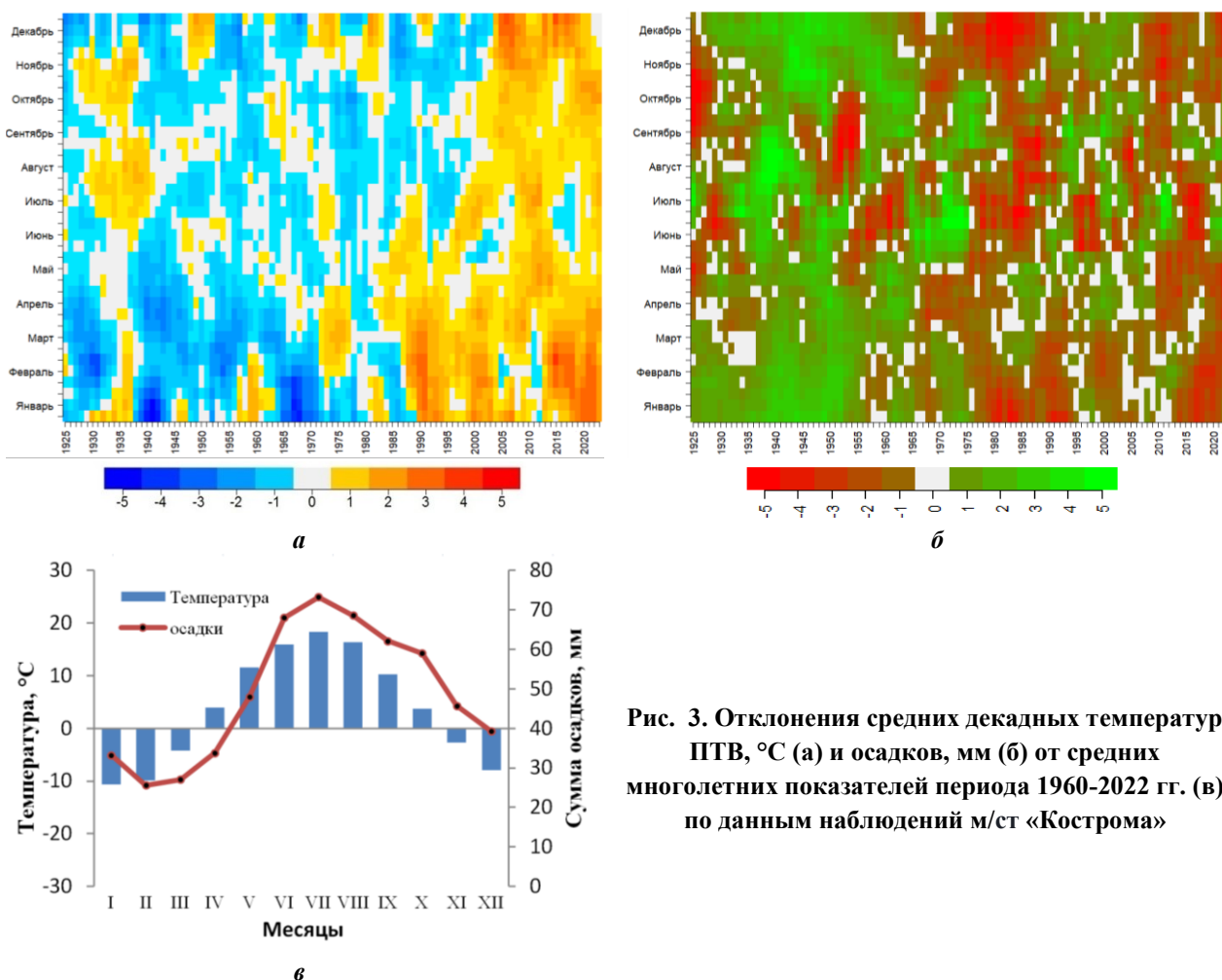


Рис. 3. Отклонения средних декадных температур ПТВ, °С (а) и осадков, мм (б) от средних многолетних показателей периода 1960-2022 гг. (в) по данным наблюдений м/ст «Кострома»

Рост величин продуктивности зелёной фитомассы лесных сообществ на территории наглядно продемонстрирован ростом значений спектрального индекса IVCI между годами, рассчитанного по величинам максимумов отдельных вегетационных периодов (рис. 4). Начало наблюдений связано с преобладанием наиболее низких показателей (2000-2005 гг.), постепенным увеличением амплитуды варьирования и формированием суммарного тренда в направлении роста показателя (2006-2009 гг.), постепенным переходом в область устойчивых значений, превышающих средние величины (2013-2023 гг.). По мнению Liu, Kogan, 1996 значения IVCI ниже 0,3 свидетельствуют о стрессовом состоянии растительности, неблагоприятных по климатическим показателям годам. Диапазон значений от 0,3 до 0,7 – об удовлетворительном, близком к многолетнему среднему показателю. Значения выше 0,7 характеризуют благоприятные погодные условия для формирования высокой продуктивности. В отдельные годы (2010–2012 гг., 2017–2018 гг.) для лесных сообществ отмечены периоды снижения продуктивности, связанные прежде всего с температурными показателями. Анализ связи индекса с показателями ПТВ демонстрирует наличие значимой положительной корреляции с показателями средней температуры июня (хвойные $r^2 = 0,72$, $p = 0,0001$; лиственные $r^2 = 0,67$, $p = 0,0004$). Наибольшие площади участков фитоценозов для класса IVCI < 0,3 отмечены в неблагоприятные для роста растений годы: 2000 г., 2003 г., 2012 г., 2017 г. (рис. 5). Суммарный линейный тренд изменений площади этого класса для хвойных лесов характеризуется постепенным снижением показателя ($y = -1,73x + 50,0$; $r^2 = 0,4$). В 2000 году площадь класса составляла 70,8% территории, а в 2023 году — 5,7%. Схожая картина отмечена и для лиственных лесов.

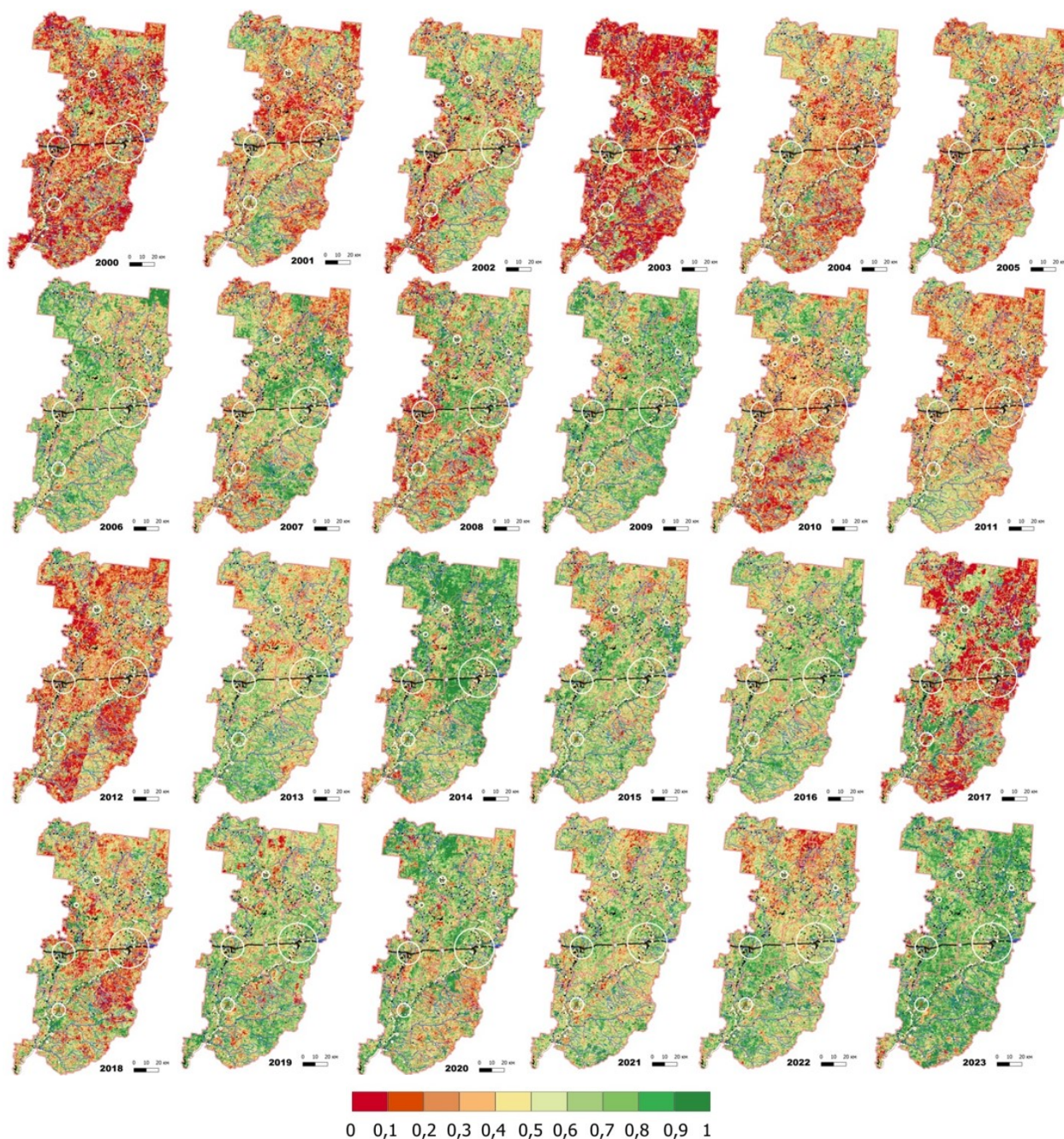


Рис. 4. Ход величин индекса IVCI, характеризующего состояние растительного покрова в течение 2000-2023 гг. Данные обработки съемки MODIS

Наиболее благоприятные для роста продуктивности условия отмечены в 2006-2009 гг., 2014 г., 2020 г., 2023 г. В эти годы увеличивается площадь сообществ с высокими величинами IVCI (выше 0,7) на фоне снижения доли низкопродуктивных сообществ. Суммарный линейный тренд изменений площади этого класса для хвойных лесов (схожие изменения и для лиственных) характеризуется ростом ($y = 1,33x + 4,22$; $r^2 = 0,47$). В 2000 г. показатель отмечен для 3,5% площади, а в 2023 г. – 61,8%. Класс величин индекса IVCI средних показателей (0,3-0,7), площадных характеристик, имел очень слабый рост ($y = 0,40x + 45,8$; $r^2 = 0,06$).

■ IVCI > 0.7 "рост продуктивности" ■ IVCI 0.3-0.7 "среднее" ■ IVCI < 0.3 "стресс"

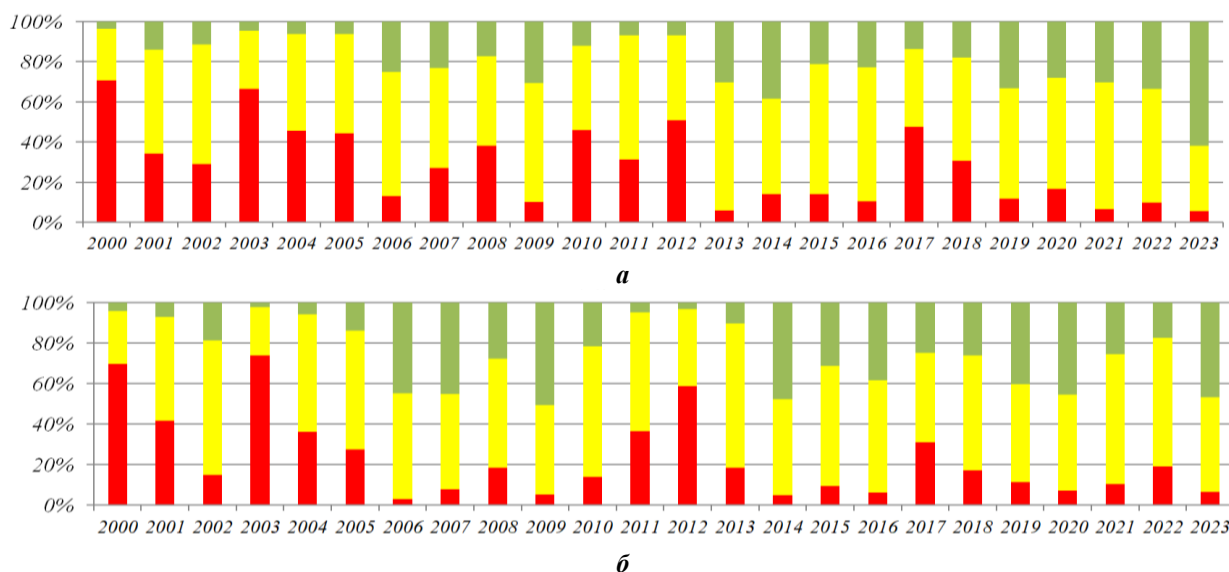


Рис. 5. Соотношение площадей классов хвойных (а) и лиственных (б) лесов с разными значениями IVCI для территории пяти районов Костромского Заволжья

При сравнении ответной реакции лиственных и хвойных сообществ на меняющиеся метеорологические условия периода последних десятилетий следует, что классы растительного покрова с доминированием хвойных пород в годы, благоприятные росту продуктивности, сохраняли более низкие показатели («стресс»), чем лиственные леса. Большинство значений для хвойных лесов принимало более низкие показатели, что находит отражение в локализации значений ниже диагональной линии (рис. 6а). Лиственные леса более активно увеличивали продуктивность (рост класса с более высокими значениями IVCI), чем хвойные (рис. 6в). Доля лесов с характеристиками средних величин диапазона IVCI между классами не была выражена (рис. 6б).

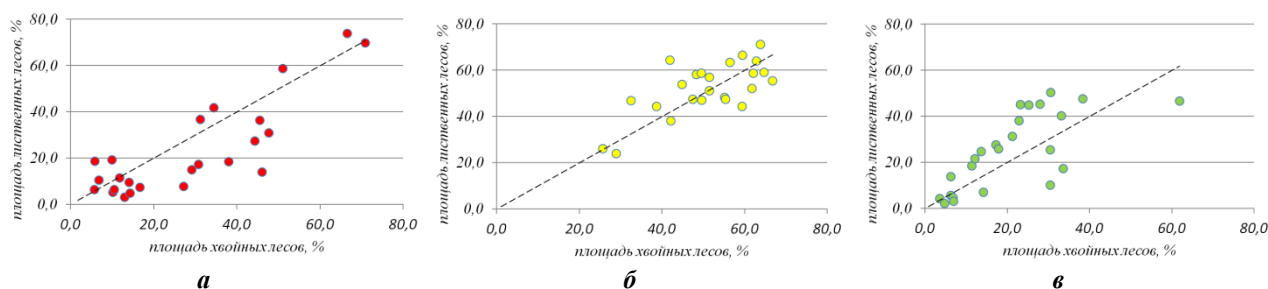


Рис. 6. Соотношение площадей классов хвойных и лиственных лесов с разными значениями IVCI для территории пяти районов Костромского Заволжья: класс индекса «стресс» (а), «среднее» (б), «рост продуктивности» (в)

Заключение

Таким образом, проведённые исследования позволили установить, что для 30-летнего временного периода (1985-2018) на территории Костромского Заволжья в пределах пяти модельных районов наблюдается рост лесопокрытых территорий от 72,5% до 83,4%. В пределах лесных сообществ с 2000 по 2023 гг. наблюдается рост площадей более продуктивных сообществ и снижение менее продуктивных. В качестве основного драйвера

изменений выступает приземная температура воздуха июня. Лиственные леса более активно реагировали на изменения условий, что выражалось в большем росте классов с повышенными значениями продуктивности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ) в рамках реализуемого на базе НИУ «Высшая школа экономики» проекта № 24-68-00055 «Из прошлого в будущее: сельские сообщества в условиях постаграрного вектора трансформаций».

Библиографический список

1. Григорьев А.А., Дэви Н.М., Кукарских В.В., Вьюхин С.О., Галимова А.А., Моисеев П.А., Фомин В.В. Структура и динамика древостоев верхней границы леса в западной части плато Путорана // *Экология*, 2019. № 4, С. 243-254. DOI: 10.1134/S0367059719040073
2. Шинкаренко С.С., Барталёв С.А. Многолетняя динамика NDVI аридных пастбищных ландшафтов Европейской России и сопредельных территорий // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2022. Т. 19. № 6. С. 108-123. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-108-123
3. Jin Y., Yang X., Qiu J., Li J., Gao T., Wu Q., Zhao F., Ma H., Yu H., Xu B. Remote sensing-based biomass estimation and its spatio-temporal variations in temperate grassland, Northern China // *Remote Sensing*, 2014. Vol. 6. pp. 1496-1513. <https://doi.org/10.3390/rs6021496>
4. Kharuk V.I., Petrov I.A., Im S.T. Tree clusters migration into alpine tundra, Siberia // *Journal of mountain science*, 2022. Vol. 19, № 12. pp. 3426-3440. 10.1007/s11629-022-7555-7
5. Liu W.T., Kogan F.N. Monitoring regional drought using the Vegetation Condition Index // *International Journal of Remote Sensing*, 1996. Vol. 17, №14. pp. 2761-2782. <https://doi.org/10.1080/01431169608949106>

References

1. Grigoriev A.A., Davy N.M., Kukarskikh V.V., Vyukhin S.O., Galimova A.A., Moiseev P.A., Fomin V.V.. Struktura i dinamika drevostoev verkhnei granitsy lesa v zapadnoi chasti plato Putorana (Structure and dynamics of stands of the upper forest boundary in the western part of the Putorana Plateau). *Ecology*, 2019. No. 4. pp. 243-254.
2. Shinkarenko S.S., Bartalev S.A. Mnogoletnyaya dinamika NDVI aridnykh pastbishchnykh landshaftov Evropeiskoi Rossii i sopredel'nykh territorii (Long-term dynamics of NDVI of arid pasture landscapes of European Russia and adjacent territories). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022. Vol. 19, No 6. pp. 108-123. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-108-123
3. Jin Y., Yang X., Qiu J., Li J., Gao T., Wu Q., Zhao F., Ma H., Yu H., Xu B. Remote sensing-based biomass estimation and its spatio-temporal variations in temperate grassland, Northern China. *Remote Sensing*, 2014. Vol. 6. pp. 1496-1513. <https://doi.org/10.3390/rs6021496>
4. Kharuk V.I., Petrov I.A., Im S.T. Tree clusters migration into alpine tundra, Siberia // *Journal of mountain science*, 2022. Vol. 19, No. 12. pp. 3426-3440. 10.1007/s11629-022-7555-7
5. Liu W.T., Kogan F.N. Monitoring regional drought using the Vegetation Condition Index. *International Journal of Remote Sensing*, 1996. Vol. 17, No. 14. pp. 2761-2782. <https://doi.org/10.1080/01431169608949106>