

Оригинальная статья

УДК 630*1/9:551.583

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-129-135>



ТИПОЛОГИЯ КАЛЕНДАРНЫХ ЛЕТ КАК ИНСТРУМЕНТ ОБОСНОВАНИЯ АДАПТАЦИИ ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ К КЛИМАТИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ

В.К. Хлюстов^{1✉}, С.Г. Кокорин²

^{1,2} Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт мелиорации, водного хозяйства и строительства имени А.Н. Костякова; г. Москва, Российская Федерация

¹ vkhlustov@rgau-msha.ru; ORCID:0000-0001-8323-5750

² kokorin@mail.ru; ORCID:0009-0003-9113-0555

Аннотация. Цель исследований – разработать и апробировать методику типологии календарных лет на основе кластерного анализа длинного временного ряда (1836-2025 гг.) для выявления качественных смен климатических режимов и обоснования стратегических направлений адаптации лесного хозяйства региона. Представлен ретроспективный анализ климатических изменений на территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области за период 1836-2025 гг. на основе уникального месячного ряда данных. В отличие от традиционных подходов, базирующихся на анализе средних величин, предложена методика дискретной типологии календарных лет методом k-средних с выделением четырех устойчивых кластеров по комплексу гидротермических показателей. С применением непараметрических тестов Манна-Кендалла, оценщика Сенна и теста Петтита доказан необратимый переход региона в новую климатическую эпоху (Эпоха III), характеризующуюся доминированием экстремально жарких (80% частоты) и экстремально влажных (70% частоты) лет. Выявлены точки бифуркации климатической системы (1988 г. – для температуры, 1993 г. – для осадков). Обоснована неэффективность сохранения еловых монокультур в новых условиях и предложены приоритетные направления адаптации лесного хозяйства: смена лесообразующих пород, переход к регулируемой гидролесомелиорации и актуализация нормативов санитарной безопасности.

Ключевые слова: лесное хозяйство, изменение климата, типология лет, кластерный анализ, Ленинградская область, адаптация, экстремальные явления, тест Петтита, ельники

Для цитирования: Хлюстов В.К., Кокорин С.Г. Типология календарных лет как инструмент обоснования адаптации лесного хозяйства Ленинградской области к климатическим изменениям. Природообустройство. 2026;Т.19(3):129-135. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-129-135>

Scientific article

TYPOLOGY OF CALENDAR YEARS AS A TOOL FOR SUBSTANTIATING THE ADAPTATION OF FORESTRY IN THE LENINGRAD REGION TO CLIMATE CHANGE

V.K. Khlyustov^{1✉}, S.G. Kokorin²

Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy; A.N. Kostyakov Institute of Land Reclamation, Water Management and Construction; Moscow, Russian Federation

¹ vkhlustov@rgau-msha.ru; ORCID:0000-0001-8323-5750

² kokorin@mail.ru; ORCID:0009-0003-9113-0555

Abstract. This article presents a retrospective analysis of climate changes in the territory of St. Petersburg and Leningrad region for the period from 1836 to 2025 based on a unique monthly data series. Unlike traditional approaches that rely on the analysis of average values, a method for discrete typology of calendar years using the k-means clustering technique was proposed, with four stable clusters identified according to a complex of hydrothermal indicators. Using nonparametric Mann-Kendall, Sen's estimator, and Pettitt tests, an irreversible transition of the region into a new climatic era (Era III) has been proven, characterized by the predominance of extremely hot (80% frequency) and extremely wet (70% frequency) years. Points of bifurcation of the climate system have been identified (1988 for temperature, 1993 for precipitation). The inefficiency of preserving spruce monocultures under new conditions has been justified, and priority directions for adapting forestry have been proposed: changing the dominant tree species, transitioning to regulated hydro-forest improvement, and updating safety sanitary norms.

Keywords: climate change, year typology, cluster analysis, forestry, Leningrad region, adaptation, extreme phenomena, Pettitt test, spruce stands

For citation: Khlyustov V.K., Kokorin S.G. Typology of calendar years as a tool for substantiating the adaptation of forestry in the Leningrad region to climate change. *Prirodoobustrojstvo*. 2026;19(3):129-135. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2026-3-129-135>

Введение. Проблема адаптации лесного хозяйства к изменяющемуся климату является одной из наиболее острых для Северо-Западного региона России. В течение последних десятилетий проблема изменения климата приобрела глобальное значение, что проявляется через все климатические характеристики: температуру и влажность воздуха, количество и равномерность осадков. Согласно данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с 1976 по 2020 гг. среднегодовое повышение температуры воздуха в России составило 0,51°C за десятилетие [1]. В большинстве регионов Российской Федерации наблюдается тенденция увеличения годовых сумм атмосферных осадков в среднем со скоростью 2,2% за десятилетие [2].

Для хвойных лесов Ленинградской области, исторически формировавшихся в условиях умеренно-континентального климата, критическими становятся не столько изменения средних многолетних значений, сколько частота наступления лет с аномальными гидротермическими параметрами, провоцирующими вспышки вредителей, ветровалы и усыхание древостоев [3]. Изменение климатических факторов оказывает существенное воздействие на леса: на видовое разнообразие лесных насаждений, продуктивность и рост древостоев, а также на выполнение лесохозяйственных мероприятий [4, 5]. Традиционные подходы к оценке климатических трендов, основанные на анализе средних величин, часто маскируют рост частоты экстремальных событий, которые оказывают решающее влияние на устойчивость лесных экосистем [6].

Цель исследований: разработать и апробировать методику типологии календарных лет на основе кластерного анализа длинного временного ряда (1836-2025 гг.) для выявления качественных смен климатических режимов и обоснования стратегических направлений адаптации лесного хозяйства региона.

Материалы и методы исследований. Объект исследований – климатический режим территории Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Информационная база представлена уникальным массивом месячных данных о температуре воздуха и сумме осадков за период 1836-2025 гг. (190 лет наблюдений) (рис. 1),

дополненным результатами классификации календарных лет по четырем кластерам температуры и осадков [7].

Для оценки внутригодовой структуры экстремальных лет проведен детальный анализ среднемесячных значений температуры и сумм осадков с группировкой по сезонам: зима – декабрь-февраль; весна – март-май; лето – июнь-август; осень – сентябрь-ноябрь.

Методология исследований включала в себя следующее.

1. Кластеризация. Исходные данные были обработаны методом k-средних (k-means), что позволило выделить 4 устойчивых типа лет:

– Кластер 1: Холодные/Сухие.

– Кластер 2: Умеренные (климатическая норма XIX-XX вв.).

– Кластер 3: Теплые/Влажные.

– Кластер 4: Экстремально жаркие/Экстремально влажные.

2. Расчет частот. Для анализа динамики рассчитаны 10-летние скользящие частоты встречаемости каждого кластера в неперекрывающихся декадах (1836-1845, ..., 2016-2025).

3. Статистический анализ. Для оценки значимости трендов частот использованы тест Манна-Кендалла (Mann-Kendall test) [8] и оценщик наклона Сенна (Sen's slope estimator) [9]. Для выявления точек резкого изменения режима применен тест Петтита (Pettitt's test) [10]. Данные методы широко применяются в современной практике анализа климатических и гидрологических временных рядов [11, 12].

Результаты и их обсуждение. *Динамика частот климатических типов лет.* Анализ распределения кластеров по неперекрывающимся десятилетиям выявил три отчетливые эпохи в развитии климата региона (рис. 2).

На графике рисунка 2 по горизонтальной оси указаны десятилетия; по вертикальной оси – частота встречаемости кластера, %.

Эпоха I (1836-1975 гг.) – стабильный умеренный режим. В течение 140 лет доминировали годы Кластеров 1 и 2 (холодные и умеренные). Суммарная частота этих типов в отдельные десятилетия достигала 90-100%. Частота появления экстремально жарких лет (Кластер 4) стремилась к нулю, фиксируясь лишь как единичные случайные события. Данный период соответствует

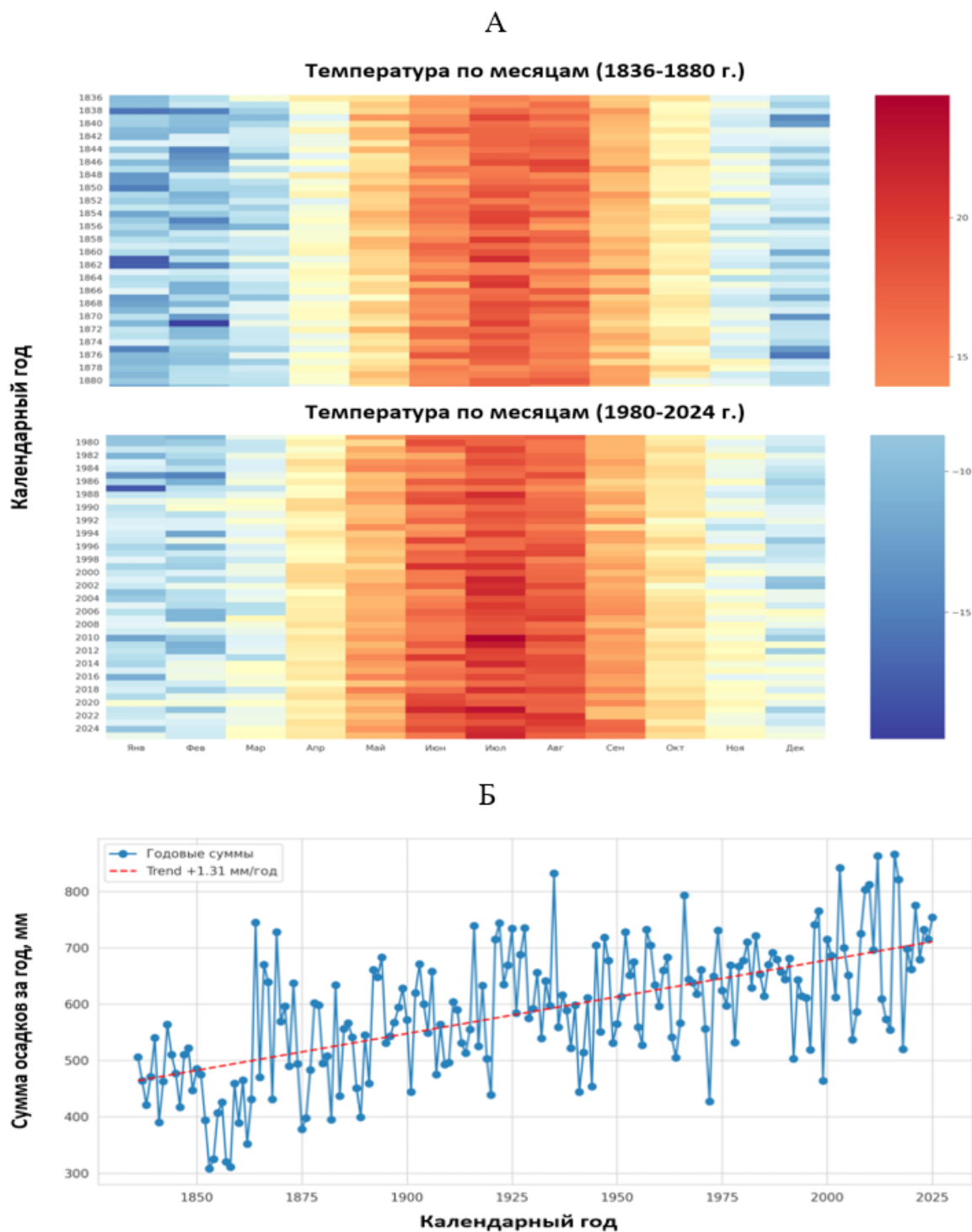


Рис. 1. Цветовая диаграмма среднемесячной температуры воздуха по годам (А) и флюктуации суммы осадков по годам (Б) за период 190 лет

Fig. 1. Color diagram of the average monthly air temperature by years (A) and fluctuations in the amount of precipitation by years (B) for a period of 190 years

исторической климатической норме, на которой базируются действующие лесоустроительные инструкции.

Эпоха II (1976-1995 гг.) – переходный период, характеризующийся ростом вариативности и началом вытеснения холодных лет теплыми (Кластер 3). Частота Кластера 4 начинает уверенный рост, достигая 10-30% в десятилетия.

Наблюдается дестабилизация прежнего равновесия.

Эпоха III (1996-2025 гг.) – эпоха экстремумов. В последние три десятилетия произошла фундаментальная смена режима. По данным последнего окна (2016-2025 гг.):

– частота экстремально жарких лет (Кластер 4) достигла 80%;

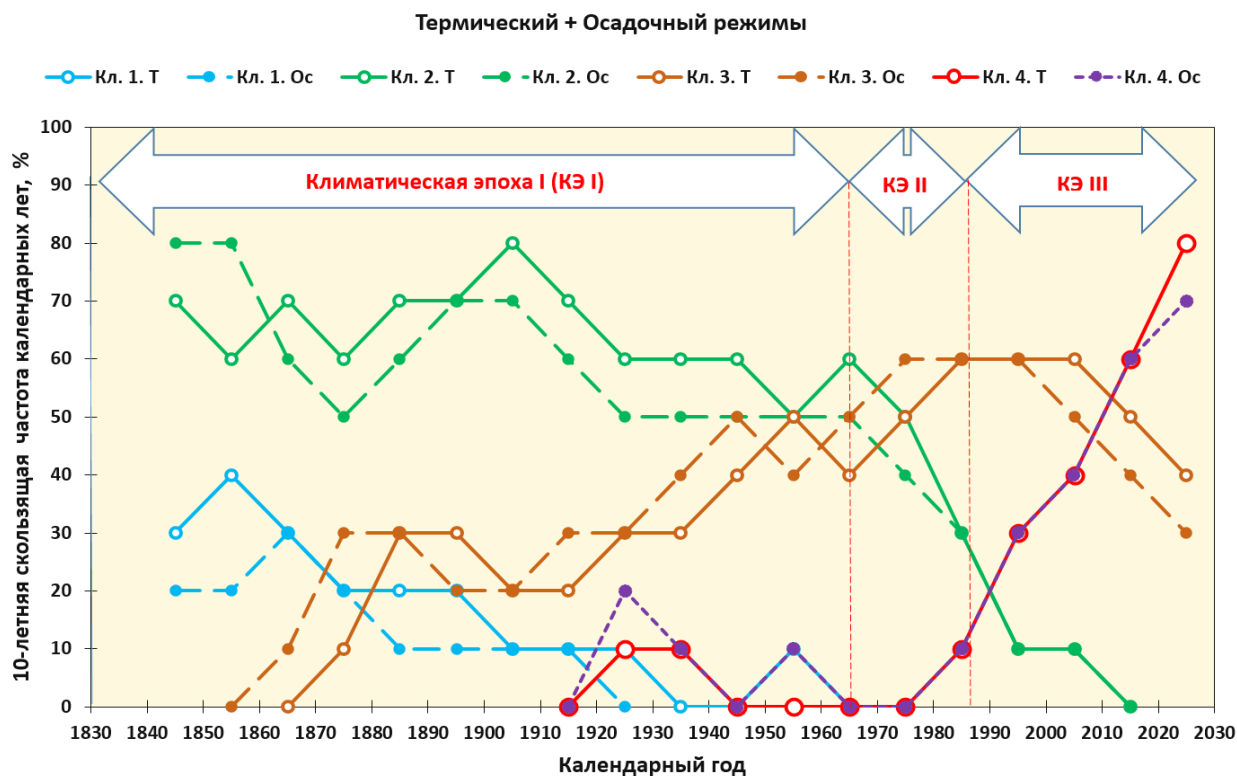


Рис. 2. Динамика 10-летней скользящей частоты календарных лет термического и осадочного режимов по кластерам и климатическим эпохам

Fig. 2. Dynamics of the 10-year sliding frequency of calendar years of the thermal and sedimentary regime by clusters and climatic epochs

– частота экстремально влажных лет (Кластер 4) составила 70%;

– доля холодных (Кластер 1) и умеренных (Кластер 2) лет снизилась до 0%.

Таким образом, климатическая «норма» сместилась в зону экстремальных значений. Годы, которые в XIX в. считались аномально теплыми и влажными, стали преобладающим типом. Полученные по представленной методике результаты убедительно указывают на значительную трансформацию климатических условий в регионе за последние десятилетия, что позволяет более детально оценить качественные сдвиги в климатической системе.

Гидротермическая структура экстремальных лет (Кластер 4). Детальный анализ месячных данных внутри лет, классифицированных как Кластер 4, выявил специфические черты нового климатического режима, критичные для лесного хозяйства.

Зимний период (декабрь-февраль): в годы Кластера 4 зима претерпевает фундаментальные изменения по сравнению с исторической нормой (Кластеры 1-2).

Температурный режим: средняя температура зимних месяцев в Кластере 4 составляет $+0,4^{\circ}\text{C}$ (против $-9,4^{\circ}\text{C}$ в Кластере 1).

Январь: среднее значение составляет $-0,5^{\circ}\text{C}$. В отдельные годы (например, 2020, 2024 гг.) наблюдались положительные среднемесячные температуры, что исключает формирование устойчивого снежного покрова.

– Февраль: среднее значение составляет $+0,9^{\circ}\text{C}$. Частые оттепели приводят к чередованию замерзания и оттаивания почвы.

Режим увлажнения: сумма осадков за зиму в Кластере 4 достигает в среднем 180-190 мм (в пересчете на воду), что на 40-50% выше, чем в сухие периоды. Однако из-за положительных температур эти осадки часто выпадают в виде дождя или мокрого снега, приводя к образованию ледяной корки на почве и стволах деревьев.

– Декабрь: средняя сумма осадков составляет 68 мм (максимум в ряду данных – более 100 мм в отдельные годы); январь – 59 мм; февраль – 54 мм.

Последствия для леса. Сочетание отсутствия снежного «одеяла» (по причине $t > 0^{\circ}\text{C}$) и промерзания почвы во время кратковременных похолоданий приводит к вымерзанию корней ели обыкновенной (*Picea abies*). Одновременно высокая влажность и положительная температура создают идеальные условия для развития грибных патогенов и преждевременного пробуждения стволовых вредителей.

Летний период (июнь-август). Лето в Кластере 4 характеризуется не только жарой, но и аномальным переувлажнением:

- средняя температура лета составляет +19,2°C (против +15,7°C в Кластере 1). Пик приходится на июль (+21,1°C);

- летняя сумма осадков достигает 326 мм, что значительно превышает испаряемость в отдельные периоды, вызывая временное переувлажнение почв даже на дренированных территориях;

- июльская средняя сумма осадков составляет 112 мм, при этом частота ливней (> 30 мм/сутки) возрастает в 3-4 раза по сравнению с нормой.

Статистическое подтверждение смены режимов. Результаты применения непараметрических тестов к рядам частот Кластера 4 подтверждают высокую значимость выявленных трендов.

1. Тест Манна-Кендалла: для частот жарких лет получено значение $Z = +5,8$ ($p < 0,001$), для влажных лет $Z = +5,4$ ($p < 0,001$). Это свидетельствует о высоко статистически значимом восходящем тренде.

2. Оценщик Сенна: наклон тренда составляет +2,1% за десятилетие для температуры и +1,9% для осадков. Это означает, что каждые 10 лет риск наступления критических условий возрастает более чем на 2%.

3. Тест Петтита: выявлены четкие точки бифуркации, разделяющие климатические эпохи:

- для температурного режима – 1988 г.;
- для гидрологического режима – 1993 г.

Значимость разрывов подтверждена низкими значениями p -value ($< 0,01$), что указывает на необратимый скачкообразный переход системы в новое состояние.

По горизонтальной оси (рис. 3) представлены десятилетия, по вертикальной оси – частота встречаемости Кластера 4. Вертикальными линиями обозначены точки бифуркации: 1988 г. – для температурного, 1993 г. – для осадочного режимов.

Последствия для лесного хозяйства Ленинградской области. Выявленная трансформация климата создает критические вызовы для современного лесного хозяйства. Наиболее уязвимыми породами являются хвойные, и прежде всего – чистые ельники.

1. Ель обыкновенная (*Picea abies*), являющаяся лесобразующей породой региона, находится в зоне максимального риска. Сочетание мягких бесснежных зим (средняя температура зимы в Кластере 4 – около +0,4°C) и жаркого влажного лета приводит:

- к вымерзанию корней ввиду отсутствия снежного покрова;

- к массовым вспышкам короеда-типографа (*Ips typographus*), цикл развития которого ускоряется в теплых условиях;

- к развитию корневых гнилей на переувлажненных почвах.

2. Увеличение частоты зимних оттепелей с мокрым снегом и дождем приводит к образованию ледяной корки на кронах и размоканию почв, что многократно увеличивает риск валежистости древостоев.

3. Действующие нормативы лесовосстановления и охраны лесов ориентированы на климат Эпохи I и II. На основе проведенного анализа сформулированы следующие стратегические направления адаптации лесного хозяйства Северо-Западного региона.

1. Трансформация породного состава предусматривает:

- поэтапный отказ от создания чистых еловых культур;

- внедрение в состав насаждений климатически устойчивых пород (лиственницы сибирской и европейской, которая устойчива к переувлажнению, дуба черешчатого, клена остролистного, ясеня обыкновенного).

2. Совершенствование лесозащитных мероприятий предусматривает:

- переход к мониторингу вредителей на основе суммы эффективных температур внутри выделенных кластеров;

- использование данных дистанционного мониторинга санитарного состояния лесов, что является эффективным способом своевременного выявления очагов усыхания и развития вредных организмов;

- сокращение нормативных сроков выборки зараженной древесины с 30 до 10-14 дней в весенне-летний период.

3. Гидролесомелиорация нового типа предусматривает:

- реконструкцию осушительных систем с переходом от простого осушения к регулируемому водному хозяйству (шлюзы-регуляторы) для управления уровнем грунтовых вод в условиях экстремальных ливней и зимних паводков.

4. Актуализация нормативов предполагает:

- пересмотр схем лесорастительного зонирования области с учетом новой частоты экстремумов;

- введение коэффициента климатического риска при проектировании лесовосстановительных работ.

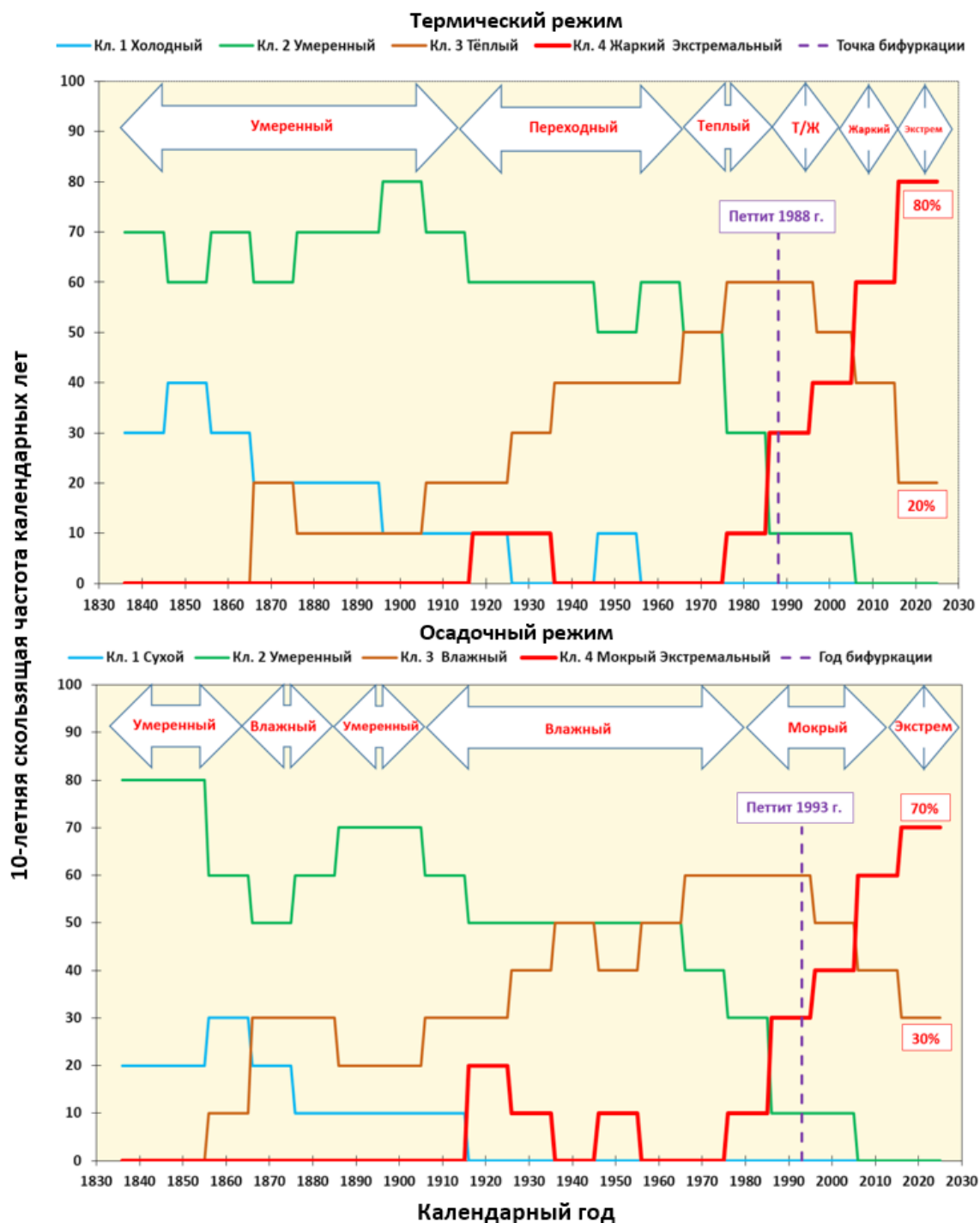


Рис. 3. Динамика 10-летней скользящей частоты календарных лет с обозначением точки перелома термического и осадочного режимов по критерию Петтита

Fig. 3. Dynamics of the 10-year sliding frequency of calendar years with the designation of the breaking point of thermal and sedimentary regimes according to the Pettit criterion

Выводы

Применение методики типологии календарных лет позволило доказать, что климат Ленинградской области претерпел качественную трансформацию, перейдя в Эпоху III с доминированием экстремально жарких и влажных условий. Традиционные подходы к управлению лесным фондом, основанные на сохранении исторического породного состава, становятся

экономически и экологически несостоятельными. Адаптация отрасли требует радикального пересмотра лесокультурной политики, приоритета смешанных насаждений и внедрения гибких систем управления водным режимом. Предложенная методика может быть рекомендована для использования при разработке лесных планов субъектов РФ и актуализации нормативно-правовой базы в условиях меняющегося климата.

Список использованных источников

1. Прожерина Н.А., Наквасина Е.Н. Изменение климата и его влияние на адаптацию и внутривидовую изменчивость хвойных пород Европейского Севера России // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2022. № 2 (386). С. 9-25. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-9-25. EDN: JHBDVE
2. Липка О.Н., Корзухин М.Д., Замолодчиков Д.Г. и др. Роль лесов в адаптации природных систем к изменениям климата // Лесоведение. 2021. № 5. С. 531-546. DOI: 10.31857/S0024114821050077. EDN: OWSSBF
3. Замолодчиков Д.Г. Потенциальные уязвимости и адаптация лесов Приморского края к изменениям климата // Вестник ИРГЦХА. 2013. № 54. С. 56-63. EDN: PVDWQH
4. Мартынюк А.А., Филипчук А.Н. Изменения климата и леса: возможные последствия и план действий // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5, № 1 (27). С. 276-279. EDN: YQESON
5. Дубенок Н.Н., Лебедев А.В., Гостева Д.Ю. Потенциальная древесная продуктивность лесов Московской области в условиях изменения климата // Лесохозяйственная информация. 2025. № 1. С. 36-48. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2025.1.04. EDN: YQESON
6. Торжков И.О., Кушнир Е.А., Константинов А.В. и др. Оценка влияния ожидаемых изменений климата на лесное хозяйство // Метеорология и гидрология. 2019. № 3. С. 40-49
7. Данные метеорологических наблюдений станции Санкт-Петербург (1836-2025 гг.). [Электронный ресурс] / Росгидромет. Режим доступа: <http://meteo.ru> (дата обращения: 20.05.2026)
8. Mann H.B. Nonparametric tests against trend // *Econometrica*. 1945. Vol. 13, № 3. Pp. 245-59. DOI: 10.2307/1907187
9. Sen P.K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau // *Journal of the American Statistical Association*. 1968. Vol. 63, № 324. Pp. 1379-1389. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934
10. Pettitt A.N. A non-parametric approach to the change-point problem // *Applied Statistics*. 1979. Vol. 28, № 2. Pp. 126-135. DOI: 10.2307/2346729
11. Gaponov V.M., Elizaryev A.N., Aksenov S.G., Longobardi A. Analysis of trends in annual time series of precipitation in the Republic of Bashkortostan, Russian Federation // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 350. Art. 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/350/1/012003
12. Tarakanov D., Elizaryev A., Fashchevskaya T., Khasanov I., Mikhailov S. Changes in the hydrological regime and Climatic variability assessment within the Belaya River catchment, Russia // *BIO Web of Conferences*. 2024. Vol. 93. Art. 04002. DOI: 10.1051/bioconf/20249304002

Информация об авторах

Виталий Константинович Хлюстов, д-р с.-х. наук, профессор, WoS ResearcherID AAE-7093-2022 Scopus AuthorID: 57210104945; ORCID: 0000-0001-8323-5750; SPIN-код: 4645-0960; AuthorID: 507286; vkhlustov@rgau-msha.ru

Сергей Геннадьевич Кокорин, аспирант, kokorins82@mail.ru; ORCID: 0009-0003-9113-0555

Вклад авторов

Хлюстов В.К. – разработка программы и проведение исследований

Кокорин С.Г. – сбор информации и разработка рекомендаций

Поступила в редакцию / Received 12.03.2026

Поступила после рецензирования / Received 24.05.2026

Принята к публикации после доработки / Accepted 27.05.2026

References

1. Prozherina N.A., Nakvasina E.N. Climate change and its influence on adaptation and intraspecific variability of coniferous species of the European North of Russia. *Forest Journal*. 2022. № 2(386). P. 9-25. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-9-25. EDN: JHBDVE
2. Lipka O.N., Korzukhin M.D., Zamolodchikov D.G., et al. Role of forests in the adaptation of natural systems to climate changes // *Dendrology*. 2021. № 5. P. 531-546. DOI: 10.31857/S0024114821050077. EDN: OWSSBF
3. Zamolodchikov D.G. Potential vulnerabilities and adaptation of the forests of the Primorsky Territory to climate changes // *Bulletin of IrSHA*, 2013. № 54. P. 56-63. EDN: PVDWQH
4. Martynyuk A.A., Filipchuk A.N. Changes in climate and forests: possible consequences and action plan // *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*. 2017. V. 5. № 1(27). P. 276-279. EDN: YQESON
5. Dubenok N.N., Lebedev A.V., Gosteva D.Yu. Potential tree productivity of forests in the Moscow region in the conditions of climate change // *Forest management information*. 2025. № 1. P. 36-48. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2025.1.04. EDN: YQESON
6. Torzhkov I.O., Kushnir E.A., Konstantinov A.V., et al. Assessment of the influence of expected climate changes on forestry // *Meteorology and hydrology*. 2019. № 3. P. 40-49.
7. Meteorological observations of the St. Petersburg station (1836-2025) [Electronic resource] / *Roshydromet*. – Available at: <http://meteo.ru> (accessed: 20.05.2026).
8. Mann H.B. Nonparametric tests against trend // *Econometrica*. 1945. Vol. 13, № 3. P. 245-59. DOI: 10.2307/1907187.
9. Sen P.K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau // *Journal of the American Statistical Association*. 1968. Vol. 63, № 324. P. 1379-1389. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.
10. Pettitt A.N. A non-parametric approach to the change-point problem // *Applied Statistics*. 1979. Vol. 28, № 2. P. 126-135. DOI: 10.2307/2346729.
11. Gaponov V.M., Elizaryev A.N., Aksenov S.G., Longobardi A. Analysis of trends in annual time series of precipitation in the Republic of Bashkortostan, Russian Federation // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 350. Art. 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/350/1/012003.
12. Tarakanov D., Elizaryev A., Fashchevskaya T., Khasanov I., Mikhailov S. Changes in the hydrological regime and Climatic variability assessment within the Belaya River catchment, Russia // *BIO Web of Conferences*. 2024. Vol. 93. Art. 04002. DOI: 10.1051/bioconf/20249304002.

Information about the authors

Vitaly K. Khlyustov, DSs (Agro), Professor, WoS ResearcherID AAE-7093-2022 Scopus AuthorID: 57210104945; ORCID: 0000-0001-8323-5750; SPIN-code: 4645-0960; AuthorID: 507286; vkhlustov@rgau-msha.ru

Sergey Kokorin, post graduate student, kokorins82@mail.ru; ORCID: 0009-0003-9113-0555

Contribution of the authors

Khlyustov V.K. – program development and research

Kokorin S.G. – collection of information and development of recommendations