

Оригинальная статья / Original article
УДК 630*561.24:581.5(470.324)
DOI: 10.18470/1992-1098-2024-4-14



Динамика радиального прироста и углерододепонирующей способности сосновых насаждений (*Pinus sylvestris* L.) под влиянием рекреационной нагрузки и климатических изменений в условиях лесостепи

Дарья А. Литовченко, Сергей С. Шешнищан, Наталия В. Яковенко

Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия

Контактное лицо

Сергей С. Шешнищан, кандидат биологических наук, руководитель лаборатории мониторинга и проектирования лесов, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова; 394087 Россия, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8.
Тел. +7 (473) 253 79 98
Email sheshnitsan@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8027-855X>

Формат цитирования

Литовченко Д.А., Шешнищан С.С., Яковенко Н.В. Динамика радиального прироста и углерододепонирующей способности сосновых насаждений (*Pinus sylvestris* L.) под влиянием рекреационной нагрузки и климатических изменений в условиях лесостепи // Юг России: экология, развитие. 2024. Т.19, N 4. С. 164-177. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-4-14

Получена 17 июля 2024 г.

Прошла рецензирование 27 сентября 2024 г.

Принята 15 октября 2024 г.

Резюме

Цель состояла в оценке влияния климатических факторов и рекреации на динамику радиального прироста и депонирования углерода в стволовой древесине сосны обыкновенной в условиях лесостепной зоны.

Исследования проводились на территории Усманского бора в Воронежской области. Для изучения антропогенного влияния на сосновые насаждения заложены пробные площади в насаждениях сосны обыкновенной в возрасте 105–145 лет на различных стадиях рекреационной дигрессии. На объектах отобраны и проанализированы керны со 120 деревьев.

Проведен анализ циклической динамики радиального прироста, связей с климатическими факторами, оценка силы влияния климатических параметров на прирост, а также расчет годичного депонирования углерода. Выявлено значительное снижение радиального прироста древостоев на поздних стадиях дигрессии, нарушение цикличности прироста. Установлена высокая положительная связь между атмосферными осадками и индексами прироста в весенне-летние месяцы ($r = 0,50$ при $p < 0,05$). У деревьев, которые пережили засуху и не пострадали от пожаров в 2010 году наблюдалась значительная и продолжительная депрессия в приросте, которая не завершилась даже спустя пять лет после неблагоприятных условий.

В условиях, когда антропогенная рекреационная нагрузка накладывается на воздействие неблагоприятных климатических факторов, деградация древостоев сосны усиливается. Это сочетание факторов приводит к еще более значительным изменениям в продуктивности древостоев. При этом, способность деревьев депонировать углерод значительно снижается по мере прогрессирования стадии дигрессии. Основным лимитирующим фактором для сосны в лесостепной зоне являются осадки, однако суммарное влияние климатических факторов оказалось более значимым, чем индивидуальное воздействие каждого из них.

Ключевые слова

Индекс прироста, климатические изменения, углерододепони-
рование, дендрохронология, рекреационная дигрессия.

Dynamics of radial increment and carbon sequestration of pine forests (*Pinus sylvestris* L.) affected by recreational stress and climate change in the forest steppe, Voronezh region, Russia

Daria A. Litovchenko, Sergey S. Sheshnitsan and Natalia V. Yakovenko

G.F. Morozov Voronezh State University of Forestry and Technologies, Voronezh, Russia

Principal contact

Sergey S. Sheshnitsan, G.F. Morozov Voronezh State University of Forestry and Technologies; 8 Timiryazev St, Voronezh, Russia 394087. Tel. +7 (473) 253 79 98
Email sheshnitsan@gmail.com
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-8027-855X>

How to cite this article

Litovchenko D.A., Sheshnitsan S.S., Yakovenko N.V. Dynamics of radial increment and carbon sequestration of pine forests (*Pinus sylvestris* L.) affected by recreational stress and climate change in the forest steppe, Voronezh region, Russia. *South of Russia: ecology, development*. 2024; 19(4):164-177. (In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2024-4-14

Received 17 July 2024

Revised 27 September 2024

Accepted 15 October 2024

Abstract

The aim was to assess the influence of climatic factors and recreation on the dynamics of radial increment and carbon sequestration in the stem wood of Scots pine in the environment of the forest-steppe region of Voronezh, Russia.

The research was carried out in the Usmansky Bor, Voronezh region. Sample plots were established in 105–145-year-old pine stands at different stages of recreational degression to study the anthropogenic impact on pine forests. Cores were taken from 120 trees in the sample plots and analysed.

We analysed the cyclical dynamics of radial increment, relationships with climatic factors, assessed the strength of the influence of climatic parameters on increment and calculated annual carbon sequestration. A significant decrease in radial increment of tree stands in late degression stages and a violation of increment cyclicity was observed. A strong positive relationship between atmospheric precipitation and incremental indices was found in spring-summer months ($r = 0,50$, $p < 0,05$). Trees that survived recent drought and were not affected by wildfire in 2010 showed a significant and prolonged depression in stem growth, which had not completed even after five years of adverse environmental factors.

When anthropogenic recreational pressure is combined with the effects of adverse climatic factors, the degradation of pine stands increases significantly. This combination of factors leads to even more significant changes in forest productivity. At the same time, the carbon sequestration capacity of the trees decreases significantly as the stage of degradation progresses. The main limiting factor for pine in the forest-steppe zone is precipitation but the total influence of climatic factors was more significant than the individual effects of each of them.

Key Words

Incremental index, climate change, carbon deposition, dendrochronology, recreational degression.

ВВЕДЕНИЕ

Леса являются ключевым компонентом глобального углеродного цикла. По последним данным, глобальный сток углерода в лесах оставался стабильным в течение последних трех десятилетий на уровне $3,6 \pm 0,4$ Гт С/год. Однако за этой общей стабильностью незаметными остаются значительные региональные изменения, в частности увеличение стока в умеренных (+30%) и снижение в бореальных (–36%) лесах из-за усиления нарушений в лесных экосистемах и обезлесения [1]. В последние десятилетия наблюдается устойчивая тенденция к сокращению площади лесных экосистем на фоне усиливающегося влияния последствий климатических изменений [2; 3]. Повышение температуры воздуха и изменение режима осадков приводят к увеличению частоты нарушений в лесах и ухудшению санитарного состояния древостоев, что негативно сказывается на их углерододепонирующей способности [4].

Помимо климатических факторов, существенное влияние на продуктивность лесных экосистем оказывает антропогенная нагрузка, в частности рекреационное использование лесов. Рекреационная нагрузка на лесные насаждения приводит к их постепенной деградации, выражающейся в снижении продуктивности, ухудшении санитарного состояния, нарушении структуры и видового состава растительности [5]. В условиях Центральной лесостепи Русской равнины особенно остро проявляется проблема рекреационной дигрессии насаждений в местах массового отдыха населения. Особый интерес представляет изучение сосновых насаждений Усманского бора, занимающих около половины его площади и играющих важную роль в депонировании углерода в малолесном лесостепном регионе [6; 7; 8]. В условиях интенсивной рекреационной нагрузки и меняющегося климата оценка их углерододепонирующей способности приобретает особую актуальность для разработки стратегий смягчения последствий климатических изменений и сохранения лесных экосистем.

Оценка углерододепонирующей способности лесных экосистем и факторов, влияющих на нее, является важной научной и практической задачей. Данные о запасах и потоках углерода в лесах

необходимы для разработки стратегий смягчения последствий изменения климата. Кроме того, информация о влиянии климатических изменений и антропогенной деятельности на продуктивность и углерододепонирующую способность лесов необходима для разработки эффективных мер по сохранению и восстановлению лесных экосистем [9; 10].

Целью данного исследования является оценка влияния климатических факторов и рекреационной нагрузки на динамику радиального прироста и депонирование углерода в стволовой древесине сосны обыкновенной в условиях лесостепной зоны.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Усманский бор приурочен к водоразделу рек Воронеж и Усмань и находится в лесостепной зоне. Большей частью он расположен на территории Воронежской области, однако его северная часть простирается и на Липецкую область. Несмотря на то, что в настоящее время доля естественных сосняков сократилась примерно до половины от общей площади, на его территории выделяются все типы соснового леса.

Изучение антропогенного влияния осуществлялось на постоянных пробных площадях (далее – ПП). Район исследования – туристическая база «Летние зори», вблизи которой были заложены 5 ПП, каждая площадью 0,5 га (50 м × 100 м), за исключением ПП N1, площадь которой составила 1 га. Возраст чистых естественных сосняков для исследования – 105–145 лет. ПП приурочены к типу лесорастительных условий В₂ с преобладающим типом леса сосняк травяной (С_{срт}). Расположение ПП было выбрано таким образом, чтобы учесть все стадии рекреационной дигрессии. Исследования позволили выявить ослабление интенсивности дигрессии, связанное с удалением от турбазы. Так, в ПП N1 насаждения характеризуются четвертой стадией дигрессии, в ПП N2 отмечается переход с третьей стадии в четвертую, в ПП N3 – со второй в третью, в ПП N4 – сохраняется вторая стадия, а в ПП N5 древостой характеризуется отсутствием антропогенных нарушений.

Таксационная характеристика древостоев на ПП в условиях разной степени антропогенной нарушенности обобщена и представлена в таблице 1.

Таблица 1. Таксационная характеристика древостоев сосны обыкновенной на пробных площадях Левобережного участкового лесничества

Table 1. Characteristics of Scots pine stands on sample plots of Levoberezhny district forestry

Пробная площадь / Sample plot	ПП 1 SP 1	ПП 2 SP 2	ПП 3 SP 3	ПП 4 SP 4	ПП 5 SP 5
Стадия рекреационной дигрессии Stage of recreational degression	IV	III–IV	II–III	II	I
Тип лесорастительных условий Forest growth conditions type	B ₂	B ₂	B ₂	B ₂	B ₂
Тип леса / Forest type	С _{срт}	С _{срт}	С _{срт}	С _{срт}	С _{срт}
Состав / Composition	10С	10С	10С	10С	10С+Б
Возраст, лет / Age, years	152	116	116	142	157
Бонитет / Site index	II	II	II	II	II
Средняя высота, м / Mean height, m	32	30	29	29	29
Средний диаметр, см / Mean diameter, cm	42	41	39	40	42
Полнота / Canopy cover	0,55	0,58	0,54	0,53	0,58
Запас на 1 га, м³ / Volume stock, m³	462	360	328	302	335

На объектах исследования в сентябре 2022 г. отобраны с помощью возрастного бурава керны со стволов на уровне 1 м от земной поверхности у 120 деревьев сосны обыкновенной, из которых 100 кернов использовали для анализа циклической динамики радиального прироста с последующим выявлением её связи с климатическими параметрами. Разброс возрастных значений был не велик – 116–157 лет.

Ширина годичных колец в образцах кернов определялась с помощью установки LINTAB-6 и пакета прикладных программ TSAP-Win (Rinntech Inc.). Кроме того, были рассчитаны относительные индексы с помощью программы TREND [11] по общепринятой методике [12]. Для расчёта возрастного тренда выбирался различный период осреднения, при этом применялся метод скользящего сглаживания с последующей аппроксимацией полиномиальной функцией.

Для дендрохронологических рядов рассчитывались традиционные для вариационной статистики показатели – среднее значение ширины годичных колец, вероятная ошибка, коэффициент вариации, стандартное отклонение, а также специализированные соотношения – сигнал-шум (SNR) и выраженный сигнал популяции (EPS) [13].

Для оценки сходства или различия индивидуальных хронологий годичных колец с осреднённым показателем рассчитывали коэффициент корреляции (CC), коэффициент синхронности (GLK) и уровень синхронности (GSL), а также индекс перекрёстного датирования индивидуальных хронологий со средней (CDI) [12]. При этом значения GLK менее 67 % относили к низкой синхронности рядов со средним, а значения GLK в диапазоне 79–100 % – к высокой синхронности. Значения GSL ниже 56 % свидетельствуют об отсутствии синхронности. По мере роста показателя синхронность также возрастает: 57–60 % – помечается звездочкой (*); 60–64 % – помечается (**); >68 % – помечается (***) . Межгодовую изменчивость прироста годичных колец для индивидуальных хронологий выражают при помощи коэффициента чувствительности, который представляет собой относительную величину. Для расчёта индекса перекрёстного датирования индивидуальных хронологий со средней (CDI), значения которого принимаются достоверными при показателях более 10%, использовали коэффициент синхронности (GLK), коэффициент корреляции (CC) и *t*-критерий Стьюдента (t_{st}).

Климатические параметры для анализа получены на метеостанции N34123 «Воронеж» (51°42'55" с.ш., 39°12'57" в.д.) [14]. Расчёты произво-

дились с использованием сумм атмосферных осадков и среднемесячных температур воздуха.

Для оценки связи между радиальным приростом сосны и климатическими факторами использовался коэффициент линейной корреляции Пирсона (r), а для его интерпретации применялась шкала Чеддока. Кроме того, для части деревьев, включённых в выборку по стадиям дигрессии, был проведен анализ их реакции на засуху. Для этого были выделены три временных отрезка [15]: за 2–3 года до засухи, собственно засуха, которая создает стрессовые условия, а также 2–3 года после стрессирующего события (засухи).

Продуктивность древостоя и депонирование углерода древесиной (при этом вклад в депонирование кроны и корней не учитывался – только наземной части ствола) оценивали по годовичному объёмному приросту за последние 10 лет, при этом предполагалось, что высота дерева остаётся неизменной. Подробное изложение методики расчётов представлено в работе [6].

Все базовые статистические расчёты и корреляционный анализ проводили помощью пакета статистического анализа STATISTICA 13.0. Во всех расчётах принят уровень значимости $p < 0,05$.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты комплексного статистического анализа полученных дендрохронологических данных показали, что параметр соотношения сигнал-шум SNR характеризуется существенной вариабельностью в диапазоне 65–85 единиц, при этом его значения детерминированы стадией рекреационной дигрессии древостоев. Это, несомненно, указывает на высокую степень гетерогенности обобщённой древесно-кольцевой хронологии, сформированной путём интеграции индивидуальных дендрохронологических рядов исследуемой выборки.

Выявленная вариабельность обусловлена преимущественно воздействием климатических детерминант, что свидетельствует о значительной чувствительности исследуемых древостоев к изменению климата. Размер выборки, представленной в настоящем исследовании, является достаточным, что убедительно подтверждается количественными показателями выраженного сигнала популяции EPS. Последний изменялся в анализируемых хронологиях в узком интервале 0,97–0,99, что существенно превосходит общепринятый пороговый уровень 0,85 (табл. 2).

Таблица 2. Статистические параметры осреднённых древесно-кольцевых хронологий сосны (*Pinus sylvestris* L.) в градиенте рекреационной дигрессии

Table 2. Statistical parameters of averaged tree-ring chronologies of Scots pine in the recreational degradation gradient

Стадия дигрессии Degression stage	I	II	II–III	III–IV	IV
Период / Term	1865–2022	1880–2022	1906–2022	1906–2022	1870–2022
Длина ряда, лет Series length, years	157	142	116	116	152
Среднее, мм Mean, mm	1,38	1,32	1,27	1	1,1
Минимум Minimum	0,3	0,2	0,1	0,05	0,05
Максимум Maximum	3,2	3	3	2,2	1,9

Стандартное отклонение Standard deviation	0,854	0,996	0,448	0,335	0,412
Стандартная ошибка Standard error	0,085	0,09	0,074	0,102	0,078
EPS	0,98	0,98	0,97	0,98	0,99

Следовательно, можно с высокой степенью достоверности констатировать, что полученные древесно-кольцевые хронологии характеризуются репрезентативностью, а среднеарифметические значения радиального прироста для каждого календарного года являются статистически значимыми индикаторами динамики роста генеральной совокупности древостоев

на всех стадиях дигрессионной трансформации хвойных древостоев.

Обобщённые в таблице 3 показатели позволяют оценить синхронность роста деревьев в различных условиях, а также их чувствительность к климатическим изменениям.

Таблица 3. Коэффициенты синхронности осредненных рядов радиального прироста сосны (*Pinus sylvestris* L.) по общей древесине

Table 3. Synchrony coefficients of averaged series of Scots pine radial growth by total wood

№ ядра / Core No	GLK, %	GSL	CC, %	CDI, %	K _s
III–IV стадия дигрессии / Degression stage 3–4					
1	47	-	60	8	0,41
3	65	*	92	19	0,38
4	84	***	92	67	0,35
7	75	***	90	45	0,44
10	53	-	87	7	0,36
14	82	***	95	56	0,39
15	79	***	95	41	0,45
18	64	*	94	26	0,35
20	80	***	95	37	0,37
22	79	***	84	33	0,41
Среднее / Mean	66	**	79	31	0,42
IV стадия дигрессии / Degression stage 4					
3	60	-	64	17	0,31
4	55	-	90	9	0,30
6	68	*	87	24	0,32
7	64	*	81	23	0,36
9	59	-	65	3	0,37
10	64	*	12	63	0,35
15	63	-	91	23	0,38
16	63	-	53	7	0,32
18	71	**	42	17	0,31
20	61	-	77	20	0,33
Среднее / Mean	65	*	66	21	0,35
I стадия дигрессии / Degression stage 1					
4	44	-	53	31	0,55
5	76	***	89	26	0,68
9	80	***	82	45	0,51
10	83	***	76	36	0,55
11	66	*	87	9	0,57
13	81	***	93	49	0,65
8	78	***	94	36	0,64
19	66	*	91	26	0,63
20	78	***	95	48	0,66
23	79	***	81	28	0,51
Среднее / Mean	73	***	78	42	0,61

Анализируя данные таблицы 3 по стадиям дигрессии, можно заметить, что на начальных этапах показатели GLK и GSL имеют более высокие значения, что указывает на более выраженную синхронность роста деревьев. Результаты показали значительный диапазон колебаний GLK – от 47 до 80 %. Лишь один из образцов

на III–IV стадии дигрессии характеризовался уровнем синхронности 47 %, что согласно шкале С.Г. Шиятова [13], соответствует отсутствию синхронности. Средние значения синхронности для различных стадий дигрессии распределились следующим образом: для III–IV и IV стадии среднее значение составило 66 % и

65 % соответственно, отражая низкий уровень синхронности, а для I стадии – 73 %, что соответствует среднему уровню синхронности. Это может быть связано с более стабильными условиями среды и меньшим антропогенным воздействием на древостой на I стадии дигрессии.

Очевидно, что эти результаты подчеркивают значительные различия в уровнях синхронности на разных стадиях дигрессии, и отражают влияние условий местопроизрастания деревьев на исследуемых пробных площадях. По мере прогрессирования дигрессии наблюдается снижение этих показателей, что указывает на возрастающее влияние неблагоприятных факторов и увеличение вариабельности прироста.

Коэффициент корреляции CC также демонстрирует закономерную динамику, хотя и более вариативен, чем GLK . На ранних стадиях дигрессии он имел более высокие значения, что указывает на сильную взаимосвязь между ростом деревьев и внешними факторами, например, климатическими условиями. Однако на поздних стадиях этот показатель снижался, что может свидетельствовать о преобладающем влиянии иных факторов на прирост деревьев, включая переуплотнение в верхних горизонтах лесных почв, изменение гидрологического режима или другие последствия антропогенного воздействия [16]. Индекс перекрестного датирования CDI также показал снижение на поздних стадиях дигрессии, подтверждая гипотезу о том, что климатические факторы играют менее значимую роль в условиях интенсивной антропогенной нагрузки. Среднее значение CDI на IV стадии дигрессии самое низкое – 21 %, при этом диапазон колебаний индекса составлял один порядок – от 3 % до 63 %.

Необходимо отметить, что значения коэффициента чувствительности K_s превышают пороговое

значение 0,3, возрастая от 0,35 на IV стадии до 0,61 на I стадии дигрессии. На основании этого можно заключить о достаточно высокой восприимчивости исследуемых древостоев к стрессовым факторам окружающей среды.

Анализ вариабельности радиального прироста древостоев *P. sylvestris* L. в условиях рекреационного воздействия демонстрирует значительную зависимость от экстремальных климатических факторов, в частности, засушливых периодов. Особый научный интерес представляет реакция древесных насаждений на пролонгированные периоды засухи, особенно двухлетние, зафиксированные в периоды 1971–1972 и 2009–2010 гг. В результате их воздействия отмечено существенное повышение коэффициентов вариации, превысивших пороговое значение 60 % (табл. 4).

Примечательно, что ответная реакция древостоев проявляется на протяжении 2–3 лет после воздействия экстремальных климатических условий (периоды 1973–1974 и 2011–2013 гг.), когда отмечаются повышенные значения коэффициентов вариации. Наиболее выраженная динамика показателей вариабельности радиального прироста зафиксирована в 2011–2013 гг. При этом заметны различия в ответной реакции насаждений в зависимости от степени рекреационной нагрузки: в древостоях I стадии дигрессии (контроль) коэффициент вариации увеличился с 19,6% до 48,9%, тогда как в насаждениях II–IV стадий дигрессии данный показатель возрастал до 88,9%. Максимальные значения коэффициента вариации были зафиксированы в два наиболее засушливых года (1924 и 1975 годы), а также в годы с наибольшим количеством весенне-летних атмосферных осадков (1973 и 2012 годы) (табл. 4).

Таблица 4. Временная изменчивость (CV, %) радиального прироста сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) и точность определения среднего прироста в условиях различной рекреационной нагрузки

Table 4. Temporal variability (CV, %) of radial growth of Scots pine and accuracy of mean growth estimation in the recreational degradation gradient

Стадия дигрессии Degression stage	Среднее значение CV Mean CV	Диапазон колебаний CV CV range	Максимальный CV / год Maximum CV / year	Среднее значение вероятной ошибки (P_{sr}) Mean of probable error (P_{sr})
I	28,6	19,6 – 48,9	48,9 / 2012	5,4
II	33,7	22,7 – 54,8	54,8 / 1992	4,6
II–III	45,1	26,8 – 61,2	61,2 / 1983	4,5
III–IV	59,7	41,4 – 76,5	76,5 / 2012	5,0
IV	66,1	52,2 – 88,9	88,9 / 2010	5,6

Анализ динамики прироста годовых колец деревьев позволил выявить сложное взаимодействие между климатическими факторами и приростом стволовой древесины. Несмотря на то, что периоды засухи достаточно отчетливо отражаются на динамике прироста, их влияние не всегда прямо пропорционально интенсивности, что связано с рядом иных факторов, таких как возраст дерева, его физиологическое состояние, а также степень воздействия других экологических факторов. Наиболее значительное снижение ширины годовых колец по нашим данным действительно наблюдалось в периоды сильных засух в 1939, 1972 и 2009–2010 годах. В частности, в интервале с 1938 по 1942 год мы отмечали заметное уменьшение радиального прироста деревьев.

Длительная депрессия радиального прироста в период 2010–2014 гг. была зафиксирована у деревьев, проявивших устойчивость к экстремальным гидротермическим условиям и пирогенному фактору в 2010 году. Этот феномен особенно ярко проявлялся у деревьев на IV стадии дигрессии даже несмотря на благоприятные гидротермические условия в последующие годы: в 2012 и 2013 годах в течение вегетационного сезона выпадали обильные осадки. Кроме того, в ядрах, отобранных у деревьев на IV стадии дигрессии значительно чаще встречались ложные кольца – аномалии в структуре древесины, возникающие в ответ на кратковременные изменения условий окружающей среды, такие как внезапные

похолодания или временные улучшения влагообеспеченности.

Рисунок 3 иллюстрирует изменения индексов прироста естественных сосновых древостоев на различных стадиях рекреационной дигрессии.

С началом рекреационного воздействия в 1970 году произошло заметное снижение радиального прироста древостоев. Затем отмечается некоторое увеличение показателя индекса прироста. Данные исследований позволяют заключить, что при сохранении уровня нагрузки показатели радиального прироста будут уменьшаться. В периоды 1991–1997 гг., а также с 2007 г. по настоящее время на участках с

IV стадией дигрессии отмечается уменьшение прироста. При этом для I стадии дигрессии отмечается совершенно иная картина: на протяжении всего рассматриваемого временного интервала динамика остается неизменной, амплитуда колебаний равномерна, а «реперные» годы прослеживаются очень явно.

Влияние рекреационного воздействия в наибольшей степени прослеживается в образцах, полученных из насаждений IV стадии дигрессии. Графики позволяют отметить нарушение цикличности радиального прироста, а также увеличение амплитуды колебаний.

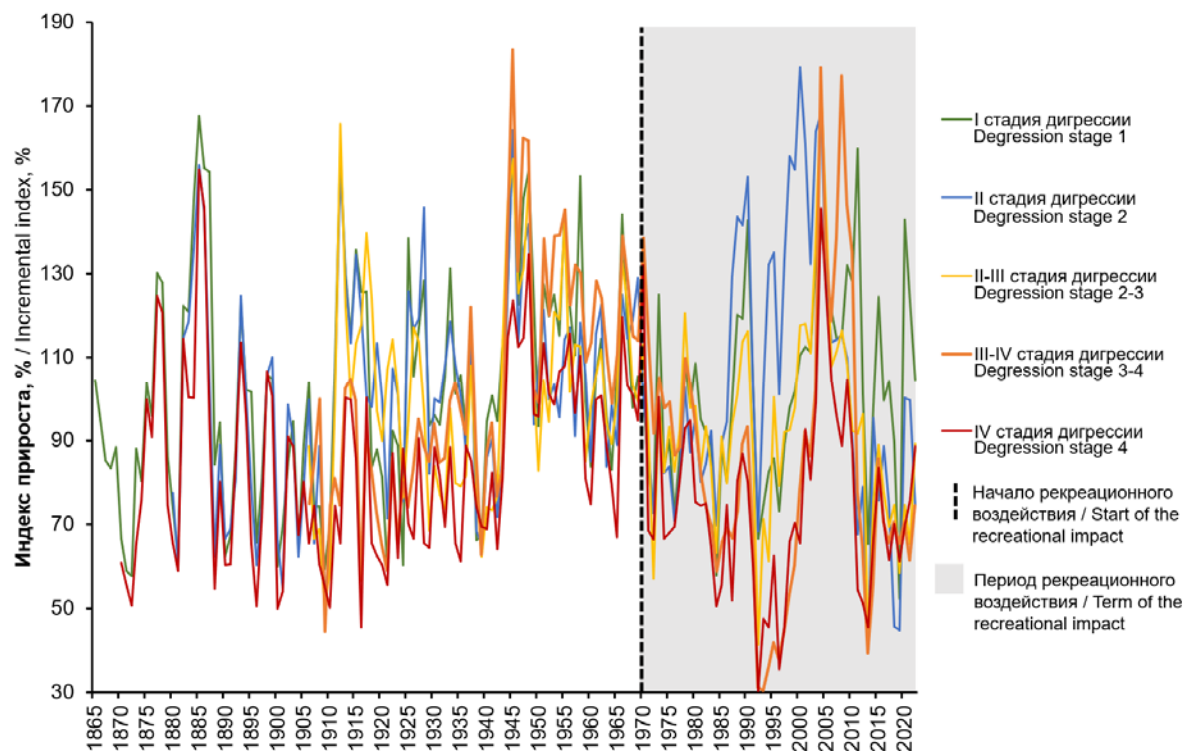


Рисунок 1. Динамика относительных индексов прироста древостоев сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) на разных стадиях рекреационной дигрессии

Figure 1. Dynamics of relative incremental indices of Scots pine stands at different stages of recreational degeneration

В целом высокий уровень рекреационной нагрузки и её длительное воздействие обуславливает снижение прироста, что негативно сказывается на древостое: деревья становятся ослабленными. Напротив, при минимальном воздействии отмечается иная тенденция прироста, которая в том числе позволяет выявить зависимость от климатических факторов. В частности, отмечается уменьшение амплитуды колебаний исследуемого показателя между образцами от I к IV стадии дигрессии.

Вегетационные периоды после засухи 2010 г. отличались теплыми и влажными условиями, однако, несмотря на это, ширина годичного кольца даже в древостоях, подверженных минимальной рекреационной нагрузке, оставалась малой (вплоть до 2022 г.). В образцах древостоев на III и IV стадиях дигрессии отсутствует положительная динамика ширины годичного кольца даже в оптимальном по условиям 2013 г., что позволяет говорить о сохранении тенденции усыхания после засухи 2010 г. То есть интенсивная рекреационная нагрузка выступила дополнительным фактором, который усугубил неспособность

ослабленных деревьев к восстановлению после засухи 2009–2010 гг. В образцах деревьев, подверженных минимальной нагрузке, напротив, отмечается увеличение прироста после завершения засухи (в 2014 г.). В целом анализ годичных колец за период 1865–2022 гг. во всей выборке подтвердил, что наиболее часто выпадающие кольца отмечаются именно в периоды наиболее сильных засух (1921, 1936, 1975 и 1992 гг.). При этом наибольшее количество случаев выпадающих колец зафиксировано для участков, подверженных наибольшей рекреационной нагрузке (IV стадия дигрессии).

Более того, в образцах, отобранных на IV стадии дигрессии, выпадающие кольца отмечаются у большей части деревьев даже в условиях более слабых и непродолжительных засух. Это может быть связано с особенностями вертикальной структуры насаждения: а именно, отсутствием нижних ярусов растительности. Это приводит к повышению скорости испарения с поверхности почвы: интенсивного (зависящего от метеоусловий), убывающего (отмечаемого при иссушении тонкого поверхностного слоя почвы) и низкого [17].

Мы также рассмотрели реакцию пяти наиболее чувствительных хронологий индексов прироста сосны на I и IV стадиях дигрессии на засуху за три временных отрезка (рис. 2): период перед засухой, период засухи и период после засухи и выявили дифференцированную реакцию отдельных деревьев. Дифференцированная

реакция на засуху наблюдалась как у деревьев, произрастающих на I стадии дигрессии, так и у деревьев, произрастающих на IV стадии дигрессии. Вариативность реакции деревьев сосны на разных стадиях дигрессии показана на рисунке 2.

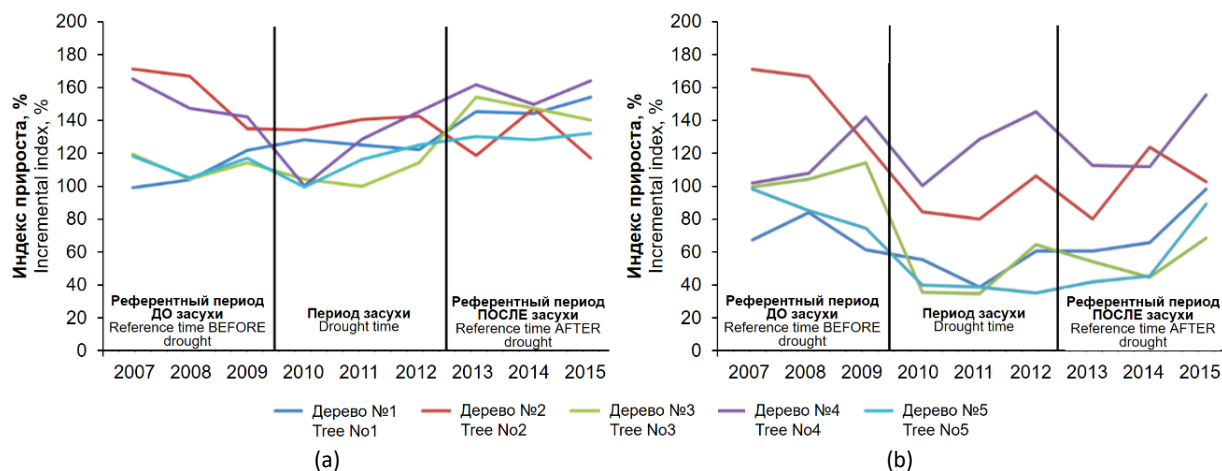


Рисунок 2. Реакция и динамика индексов прироста по отдельным деревьям во время засухи, до и после засухи: (a) I стадия дигрессии; (b) IV стадия дигрессии

Figure 2. Response and dynamics of growth indices for individual sots pine trees during drought, before and after drought: (a) degression stage 1; (b) degression stage 4

На примере отдельных деревьев заметно, что засуха приводит к замедлению роста в течение года после засухи, следовательно, минимум прироста наблюдается после воздействия климатического события. На IV стадии дигрессии можно наблюдать спады роста, в период до засухи, что может быть связано со снижением осадков в течение ряда лет перед наступлением засухи, лесорастительными условиями, где произрастает данное дерево, а также интенсивности рекреационного воздействия.

Периоды депрессии прироста могут иметь различную продолжительность даже в пределах одного древостоя: реакция деревьев на климатические воздействия индивидуальна. В частности, отдельные деревья демонстрировали интенсивное и продолжительное снижение прироста в ответ на внешнее воздействие экстремальных факторов, причем оно могло продолжаться в течение трех – четырех лет; у других деревьев снижение прироста происходило лишь на один – два года. Примечательно, что у некоторых деревьев вовсе не обнаруживалось снижение прироста или же оно происходило с запаздыванием на один год.

Оценка вклада климатических параметров в изменчивость прироста сосны на двух контрастных стадиях рекреационной дигрессии (I и IV) проведена на основе корреляционного анализа парных связей между индексами годовых колец и климатическими показателями – суммой атмосферных осадков и температурой воздуха (рис. 3 и 4).

Из анализа рисунка 3 видно, что значительную роль в формировании годовых колец играют осадки, выпадающие в апреле и мае: именно в эти месяцы коэффициенты корреляции достигают $r = 0,31$ и $r = 0,50$ соответственно (при $p < 0,05$), что отвечает периоду формирования ранней древесины. Напротив, осадки в марте не оказывают значимого влияния. Аналогично апрелю, наблюдается сходное влияние осадков,

выпадающих в августе, когда происходит формирование поздней древесины. Слабая отрицательная корреляция наблюдалась между индексами радиального прироста сосны и осадками в октябре. Исходя из данных, представленных на рисунке 4, наблюдается низкая связь радиального прироста сосны с летними осадками – коэффициент корреляции в мае достигает 0,23 (слабая связь) на IV стадии дигрессии. Коэффициент корреляции с осадками октября показывает также отрицательную зависимость ($r = -0,11$).

Необходимо отметить, что корреляционная связь индексов прироста с осадками выше, чем с температурой воздуха, при этом коэффициенты корреляции с температурой воздуха для отдельных месяцев оказались статистически незначимы. Анализ корреляционной связи между индексами годовых колец и климатическими параметрами позволяет говорить о том, что в наибольшей степени влиянию климатических факторов подвержены насаждения с наименьшим уровнем рекреационной нагрузки (I стадия дигрессии).

Для всех насаждений выборки отмечалась значимая зависимость между показателем радиального прироста и суммой осадков в июне текущего года. При этом степень связи уменьшается от менее нарушенных участков к более нарушенным (от значений коэффициента 0,24 на I стадии дигрессии до 0,13 на IV стадии). В насаждениях с минимальной нагрузкой (I стадия дигрессии) отмечается отрицательная связь показателя прироста сосны с температурами воздуха. В частности, высокие температуры декабря, предшествовавшего вегетационному сезону, негативно сказываются на приросте. Однако в отличие от показателей осадков апреля и мая текущего года, данный параметр, очевидно, является не влияющим фактором, а лишь коррелированным.

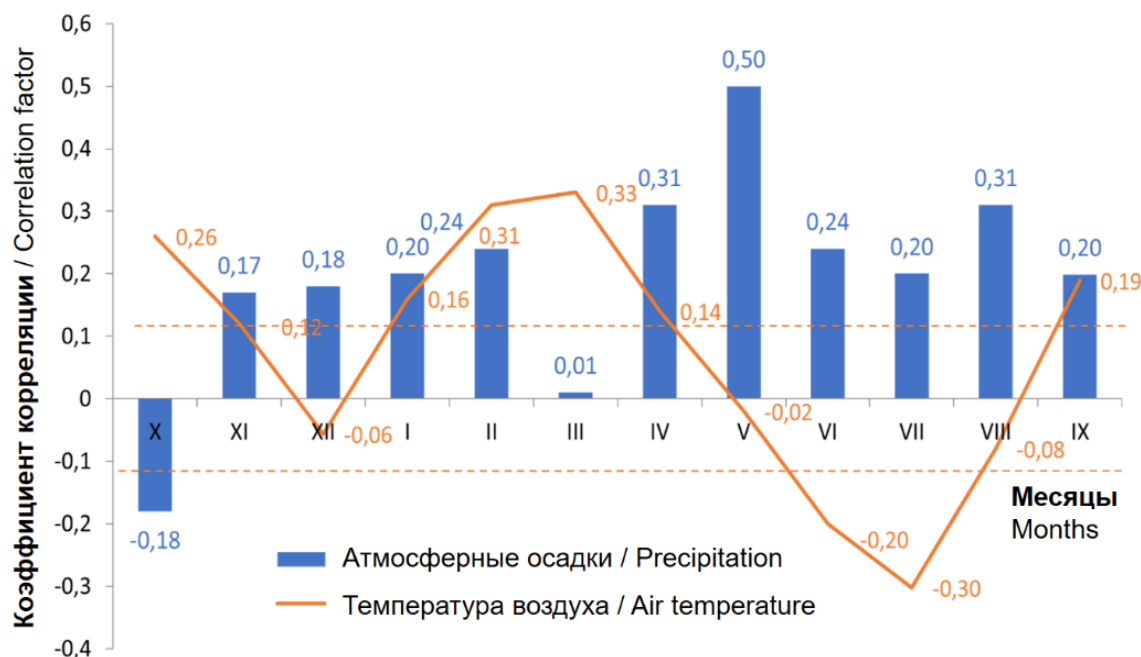


Рисунок 3. Взаимосвязь климатических параметров и радиального прироста сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) на участках с начальной стадией рекреационной дигрессии

Figure 3. Relationship between climatic parameters and radial growth of Scots pine at sites with the initial stage of recreational degeneration

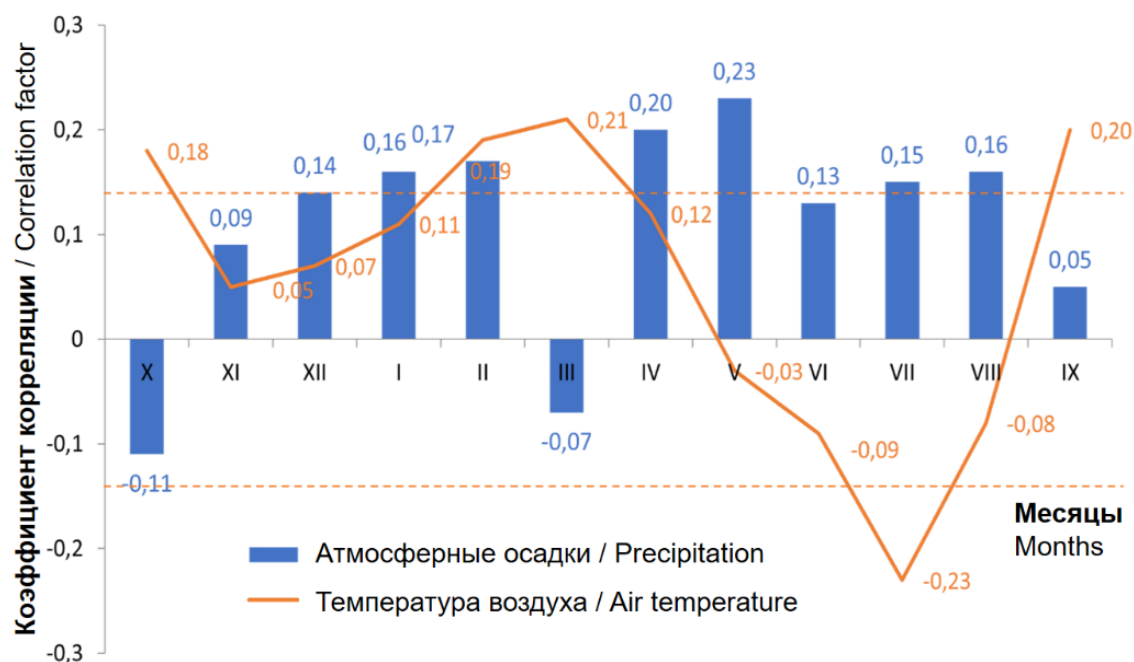


Рисунок 4. Взаимосвязь климатических параметров и радиального прироста сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) на участках с IV стадией рекреационной дигрессии

Figure 4. Relationship between climatic parameters and radial growth of Scots pine at sites with the IV stage of recreational degeneration

По всем насаждениям, включенным в выборку, была обнаружена значимая корреляция между темпами радиального прироста и суммой осадков, выпавших в июне того же года. Сила этой связи несколько ослабевает от менее нарушенных местообитаний к более нарушенным, о чем свидетельствует снижение коэффициентов с 0,24 на I стадии дигрессии до 0,13 на IV стадии. В насаждениях, подвергшихся минимальному рекреационному воздействию (I стадия), отмечена отрицательная корреляция между приростом сосны и

температурой окружающей среды. Примечательно, что повышенные температуры в декабре, предшествующие вегетационному периоду, негативно влияют на прирост. Однако при сравнении с другими коэффициентами, эта ситуация, по-видимому, свидетельствует о коррелированности фактора, а не его причинной роли.

Исследования динамики радиального прироста сосновых древостоев в относительно сухих условиях ленточных боров Прииртышского региона Восточного Казахстана позволили установить

существенную зависимость данного показателя от температурного режима [18]. Согласно полученным результатам, за пятидесятилетний период наблюдений отмечена дифференциация влияния температурного фактора: зафиксировано снижение значимости майских температур текущего вегетационного периода при одновременном усилении корреляционных связей с июльскими показателями. В последние полтора-два десятилетия выявлен устойчивый положительный тренд воздействия позднелетних и раннеосенних (август–сентябрь) температур воздуха. Аналогичная тенденция прослеживается в отношении августовских атмосферных осадков предшествующего года. Отмечено также, что связь между количеством осадков в июне–июле и годичным приростом сосны оказывается нестабильной во времени. Выявленные закономерности свидетельствуют о трансформации климатического отклика древесных растений в условиях современных изменений регионального климата.

Положительные коэффициенты корреляции между приростом сосны и зимними температурами были отмечены во многих исследованиях, проведенных в различных регионах Европы [19; 20]. Вероятно, эта тенденция объясняется повреждением деревьев и их корневых систем в условиях сильных морозов. Кроме того, при глубоком промерзании почвы (в условиях низких температур февраля) увеличивается период её оттаивания. Напротив, мягкие зимы способствуют более раннему возобновлению камбиальной активности и создают благоприятные условия для фотосинтеза.

Статистические расчеты позволяют доказать, что на прирост сосны значительное влияние оказывают климатические факторы – осадки и температура воздуха, причём наиболее выражено влияние атмосферных осадков за гидрологический год в древостоях на I стадии дигрессии (до 76 %) (табл. 5).

Таблица 5. Сила влияния климатических факторов на прирост сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.)
Table 5. Strength of influence of climatic factors on the growth of Scots pine

Индексы прироста на разных стадиях дигрессии Growth indices at different degression stages	Климатические факторы Climatic factors		
	<i>t</i>	<i>P_y</i>	<i>P_{гy}</i>
I стадия дигрессии Degression stage 1	0,41	0,73	0,76
II стадия дигрессии Degression stage 2	0,36	0,71	0,73
II–III стадия дигрессии Degression stage 2–3	0,30	0,62	0,60
III–IV стадия дигрессии Degression stage 3–4	0,22	0,40	0,36
IV стадия дигрессии Degression stage 4	0,14	0,25	0,29

Примечание: *t* – температура воздуха, °C; *P_{гy}* – атмосферные осадки за гидрологический год, мм;
P_y – сумма атмосферных осадков за год, мм
Note: *t* – air temperature, °C; *P_{гy}* – precipitation for the hydrological year, mm; *P_y* – total precipitation for the year, mm

В исследовании Шиятова с соавт. [21], посвященном анализу влияния крупномасштабных климатических циркуляций на реконструированную динамику осадков по дендрохронологическим данным лиственницы сибирской, выявлена достоверная положительная зависимость между радиальным приростом древесины и атмосферными осадками в период с февраля по октябрь, а также в июле–августе предшествующего года вегетации. В то же время корреляционный анализ продемонстрировал значимую отрицательную зависимость между шириной годичных колец и температурным режимом в мае–сентябре/октябре года, предшествующего формированию годичного слоя древесины. На основании полученных результатов авторы выдвигают гипотезу о негативном влиянии пониженных температур в завершающей фазе вегетационного периода (октябрь) на процессы ксилогенеза, что находит отражение в редукции радиального прироста древесины.

По мере увеличения возраста сосновых насаждений, их способность к депонированию углерода также возрастает. При этом средние показатели изменения скорости депонирования достигают пиковых значений к четвертому классу возраста, а затем снижаются в восьмом и последующих классах [22]. В исследованиях отмечается, что

старовозрастные леса также выполняют важную роль в митигации климатических изменений [23; 24]. Несмотря на то, что в возрасте более 150 лет сосна не имеет столь значительного поглощения углерода и скорости роста, как в более ранних классах возраста, углерододепонирующая функция также продолжает выполняться древостоем.

Согласно проведенным исследованиям, среднегодовое депонирование углерода в стволовой древесине одного «среднего» дерева в 160-летнем древостое на I стадии дигрессии за десятилетний период наблюдений (2013–2022 гг.) по нашим расчетам составило 15,2 г. Следует подчеркнуть, что данный показатель характеризуется значительной межгодовой вариабельностью: минимальные значения были зафиксированы в 2013 году (10,31 г), в то время как максимальный уровень депонирования углерода наблюдался в 2022 году (22,55 г) (рис. 5).

По результатам дендрохронологического анализа установлено, что аккумуляция углерода одним «средним» деревом на IV стадии дигрессии характеризуется существенно меньшими значениями: среднегодовое депонирование углерода за аналогичный период составило 2,6 г, при этом амплитуда колебаний варьировала от минимального значения 0,92 г (2013 г) до максимума 6,56 г (2021 г).

Кроме того, дендрохронологическая серия 2010–2013 гг. демонстрирует аномально низкие значения радиального прироста древостоя на IV стадии дигрессии, что, несомненно, обусловлено экстремальной засухой 2010 года. Климатические условия 2014–2015 и 2020 годов также характеризовались выраженным гидротермическим стрессом (рис. 5).

Анализ древесно-кольцевых хронологий показал, что для древостоев I стадии дигрессии ключевым лимитирующим фактором радиального прироста и, следовательно, депонирования углерода является гидротермический режим, в особенности сезонное распределение осадков. В то же время, древостои IV стадии дигрессии демонстрируют

устойчивую депрессию радиального прироста как в период до 2010 года, так и после него.

Дендрохронологическая реконструкция и количественный анализ погодичной изменчивости прироста позволяют судить о том, что начальный период рекреационного воздействия характеризуется значительной депрессией радиального прироста сосновых древостоев. Хотя в последующие годы наблюдается некоторая стабилизация средних значений прироста, можно с высокой степенью вероятности прогнозировать, что дальнейшее усиление рекреационной нагрузки неизбежно приведет к существенному снижению как радиального прироста, так и показателей депонирования углерода.

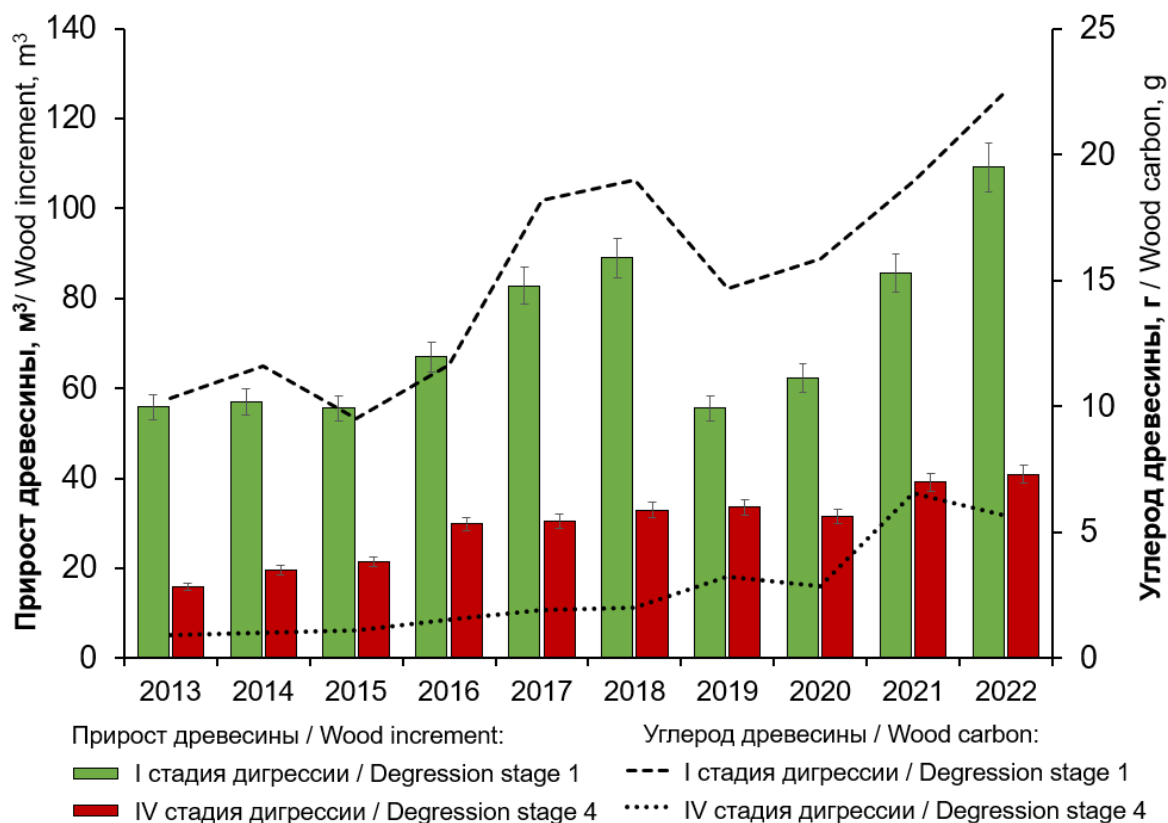


Рисунок 5. Годичное депонирование углерода одним средним деревом сосны обыкновенной на I стадии дигрессии
Figure 5. Mean annual carbon sequestration by model trees of Scots pine at degression stage 1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования выявили значительные изменения в коэффициенте изменчивости прироста древесины на всех стадиях дигрессии в период 2011–2013 годов, с особенно резкими колебаниями в наиболее засушливые и влажные годы. Установлено, что динамика радиального прироста древостоев на последних стадиях рекреационной дигрессии демонстрирует значительную вариабельность показателей годичного прироста, при этом, на IV стадии дигрессии наблюдается существенное снижение амплитуды и дестабилизация цикличности прироста древесины и депонирования углерода. Анализ древесно-кольцевых хронологий свидетельствует о наличии достоверной положительной связи между количеством атмосферных осадков и индексами радиального прироста в периоды формирования ранней (апрель – май) и поздней древесины (август). Данная закономерность убедительно подтверждает доминирующую роль

гидротермического режима как основного лимитирующего фактора, детерминирующего камбиальную активность сосны. Следует особо подчеркнуть, что синергический эффект антропогенной рекреационной нагрузки и неблагоприятных климатических факторов приводит к усилению депрессии прироста в сосновых древостоях, что отражается на формировании годичных колец и, как следствие, проявляется в снижении продуктивности лесных экосистем и секвестрации углерода.

Очевидно, что способность деревьев депонировать углерод значительно снижается по мере прогрессирования стадии дигрессии, что особенно заметно на IV стадии. В целом, результаты подчеркивают важность учета климатических и антропогенных изменений и их влияния на лесные экосистемы в долгосрочной перспективе.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации N 1023013000012-7 «Биогеохимический мониторинг цикла углерода в природных и антропогенных экосистемах Воронежской области в условиях глобального изменения климата (FZUR-2023-0001)».

ACKNOWLEDGMENT

The study was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. 1023013000012-7, Biogeochemical Monitoring of the Carbon Cycle in Natural and Anthropogenic Ecosystems of the Voronezh Region under Conditions of Global Climate Change (FZUR-2023-0001)).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Pan Y., Birdsey R.A., Phillips O.L., Houghton R.A., Fang J. et al. The enduring world forest carbon sink // *Nature*. 2024. V. 8021. N 631. P. 563–569. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07602-x>
2. De Frenne P., Lenoir J., Luoto M., Scheffers B.R., Zellweger F. et al. Forest microclimates and climate change: Importance, drivers and future research agenda // *Global Change Biology*. 2021. V. 27. N 11. P. 2279–2297. <https://doi.org/10.1111/gcb.15569>
3. Pardi F., Ruziman H.H., Suratman M.N. The Vulnerability of Forest Resources to Climate Change / Ed. by A. Raj et al. Wiley, 2023. P. 103–131.
4. Lázaro-Lobo A., Ruiz-Benito P., Cruz-Alonso V., Castro-Díez P. et al. Quantifying carbon storage and sequestration by native and non-native forests under contrasting climate types // *Global Change Biology*. 2023. V. 16. N 29. P. 4530–4542. <https://doi.org/10.1111/gcb.16810>
5. Тимащук Д.А., Потапова Э.Н. Лесоводственная оценка сосновых насаждений в зоне рекреационного воздействия в Воронежской области // *Лесотехнический журнал*. 2016. Т. 6. N 1. С. 53–61.
6. Матвеев С.М., Литовченко Д.А. Дендроклиматология сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в условиях Усманского бора Воронежской области // *Лесотехнический журнал*. 2024. Т. 13. N 4. С. 110–136. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/20>
7. Стародубцева Е.А., Ханина Л.Г. Классификация растительности Воронежского заповедника // *Растительность России*. 2009. Т. 14. С. 63–141. <https://doi.org/10.31857/S2587556623040039>
8. Morkovina S., Sheshnitsan S., Panyavina E., Ivanova A., Kuznetsov D. Opportunities and prospects for the implementation of reforestation climate projects in the forest steppe: an economic assessment // *Forests*. 2023. V. 14. N 8. P. 1611. <https://doi.org/10.3390/f14081611>
9. Константинов А.В. Сценарный подход к адаптации лесных экосистем Российской Федерации в условиях изменений климата // *Известия РАН. Серия географическая*. 2023. Т. 87. N 4. С. 558–567. <https://doi.org/10.31857/S2587556623040039>
10. Anderson-Teixeira K.J., Herrmann V., Morgan R.B., Bond-Lamberty B., Cook-Patton S.C. et al. Carbon cycling in mature and regrowth forests globally // *Environmental Research Letters*. 2021. V. 16. N 5. Article id: 053009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abed01>
11. Мироненко А.В., Матвеев С.М., Литовченко Д.А. Программа для обработки временных рядов методами скользящего среднего и математического моделирования. Патент РФ, N 2023615502, 2023.

12. Шиятов С.Г., Ваганов Е.А., Кирдянов А.В., Круглов В.Б., Мазепа В.С. и др. Методы дендрохронологии. Красноярск: Издат. центр Краснояр. гос. ун-та, 2000. 80 с.
13. Шевелина И.В., Нагимов З.Я., Нуриев Д.Н. Особенности роста озеленительных посадок березы в г. Екатеринбурге // *Материалы I Всероссийской научно-практической конференции «Ландшафтная архитектура: традиции и перспективы – 2022»*, Екатеринбург, 2022. С. 195–200.
14. Метеостанция «Воронеж». Климат Воронежа // *Погода и климат*. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=34123> (дата обращения: 20.10.2023).
15. Lloret F., Siscart D., Dalmases C. Canopy recovery after drought dieback in holm-oak Mediterranean forests of Catalonia (NE Spain) // *Global Change Biology*. 2004. V. 12. N 10. P. 2092–2099. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00870.x>
16. Лысыков А.Б., Судницына Т.Н. Влияние рекреации на почву лиственных насаждений Серебряноборского опытного лесничества // *Лесоведение*. 2008. Т. 3. С. 47–56.
17. Миронов Б.А. Экологические особенности и восстановительная динамика темнохвойных лесов Среднего Урала. Свердловск: УрО АН СССР, 1991. 127 с.
18. Данчева А.В., Залесов С.В., Муканов Б.М. Влияние климатических факторов на радиальный прирост деревьев в сосняках казахского мелкосопочника // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2020. Т. 93. N 3. С. 68–76. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.93.3.010>
19. Dauškanė I., Elferts D. Influence of climate on Scots pine growth on dry and wet soils near Lake Engure in Latvia // *Estonian Journal of Ecology*. 2011. Т. 60. N 3. С. 225. <https://doi.org/10.3176/eco.2011.3.05>
20. Edvardsson J., Rimkus E., Corona Ch., Šimanauskienė S., Kažys J., Stoffel M. Exploring the impact of regional climate and local hydrology on *Pinus sylvestris* L. growth variability – A comparison between pine populations growing on peat soils and mineral soils in Lithuania // *Plant and Soil*. 2015. V. 392. N 1-2. P. 345–356. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2466-9>
21. Шиятов С.Г. Дендрохронология, ее принципы и методы. Свердловск: Уральский Научный Центр АН СССР, 1973.
22. Рожков Л.Н. Годичная абсорбция углекислого газа сосновых древостоев в связи с возрастом // *Труды БГТУ. Серия 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*. 2020. Т. 234. N 2. С. 64–68
23. Лукина Н.В. Смирнов В.Э., Тебенюкова Д.Н., Данилова М.А., Тихонова Е.В. и др. Роль старовозрастных лесов в аккумуляции и хранении углерода // *Известия Российской Академии Наук. Серия Географическая*. 2023. Т. 87. N 4. С. 536–557. <https://doi.org/10.31857/S2587556623040064>
24. Luyssaert S., Schulze E.D., Börner A., Knohl A., Hessenmöller D. et al. Old-growth forests as global carbon sinks // *Nature*. 2008. V. 7210. N 455. P. 213–215. <https://doi.org/10.1038/nature07276>

REFERENCES

1. Pan Y., Birdsey R.A., Phillips O.L., Houghton R.A., Fang J. et al. The enduring world forest carbon sink. *Nature*, 2024,

- vol. 8021, no. 631, pp. 563–569.
<https://doi.org/10.1038/s41586-024-07602-x>
2. De Frenne P., Lenoir J., Luoto M., Scheffers B.R., Zellweger F. et al. Forest microclimates and climate change: Importance, drivers and future research agenda. *Global Change Biology*, 2021, vol. 27, no. 11, pp. 2279–2297.
<https://doi.org/10.1111/gcb.15569>
3. Pardi F., Ruziman H.H., Suratman M.N. The Vulnerability of Forest Resources to Climate Change. Ed. by A. Raj et al. Wiley, 2023, pp. 103–131.
4. Lázaro-Lobo A., Ruiz-Benito P., Cruz-Alonso V., Castro-Díez P. Quantifying carbon storage and sequestration by native and non-native forests under contrasting climate types. *Global Change Biology*, 2023, vol. 16, no. 29, pp. 4530–4542. <https://doi.org/10.1111/gcb.16810>
5. Timashchuk D.A., Potapova E.N. Silvicultural assessment of pine plantations in the zone of recreational impact in the Voronezh region. *Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering Journal]*. 2016, vol. 6, no. 1, pp. 53–61. (In Russian)
6. Matveev S.M., Litovchenko D.A. Dendroclimatology of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Usmansky pine forest conditions of Voronezh region. *Lesotekhnicheskii zhurnal [Forestry Engineering Journal]*. 2024, vol. 13, no. 4, pp. 110–136. (In Russian) <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/20>
7. Starodubtseva E.A., Khanina L.G. Classification of the vegetation of the Voronezh Nature Reserve. *Rastitel'nost' Rossii [Vegetation of Russia]*. 2009, vol. 14, pp. 63–141. (In Russian)
8. Morkovina S., Sheshnitsan S., Panyavina E., Ivanova A., Kuznetsov D. Opportunities and prospects for the implementation of reforestation climate projects in the forest steppe: an economic assessment. *Forests*, 2023, vol. 14, no. 8, pp. 1611. <https://doi.org/10.3390/f14081611>
9. Konstantinov A.V. Scenario approach to adaptation of forest ecosystems in the Russian Federation under climate change. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*, 2023, vol. 87, no. 4, pp. 558–567. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S2587556623040039>
10. Anderson-Teixeira K.J., Herrmann V., Morgan R.B., Bond-Lamberty B., Cook-Patton S.C. et al. Carbon cycling in mature and regrowth forests globally. *Environmental Research Letters*, 2021, vol. 16, no. 5, article id: 053009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abed01>
11. Mironenko A.V., Matveev S.M., Litovchenko D.A. *Programma dlya obrabotki vremennykh ryadov metodami skol'zyashchego srednego i matematicheskogo modelirovaniya* [Program for processing time series by moving average and mathematical modeling methods]. Patent RF, no. 2023615502, 2023.
12. Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Kirdyanov A.V., Kruglov V.B., Mazepa V.S. et al. *Metody dendrokronologii* [Methods of Dendrochronology]. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State University Publ., 2000, 80 p. (In Russian)
13. Shevelina I.V., Nagimov Z.Ya., Nuriev D.N. Osobennosti rosta ozelenitel'nykh posadok berezy v g. Ekaterinburge [Growth features of birch plantings in Yekaterinburg]. *Materialy Vserossiskoi konferentsii «Landshaftnaya arkhitektura: traditsii i perspektivy»*, Yekaterinburg, 2022 [Proceedings of All-Russian Conference “Landscape architecture: traditions and prospects”, Yekaterinburg, 2022]. Yekaterinburg, 2022, pp. 195–200. (In Russian)
14. Voronezh weather station. [Climate of Voronezh] *Pogoda i klimat*. (In Russian) Available at: <http://www.pogodaiklimat.ru/monitor.php?id=34123> (accessed 20.10.2023)
15. Lloret F., Siscart D., Dalmases C. Canopy recovery after drought dieback in holm-oak Mediterranean forests of Catalonia (NE Spain). *Global Change Biology*, 2004, vol. 12, no. 10, pp. 2092–2099. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00870.x>
16. Lysikov A. B., Sudnitsyna T. N. The influence of recreation of soils under deciduous stands of the Serebryanoborskii Forestry. *Lesovedenie [Russian Journal of Forest Science]*. 2008, vol. 3, pp. 47–56. (In Russian)
17. Mironov B. A. *Ekologicheskie osobennosti i vosstanovitel'naya dinamika temnokhvoinykh lesov Srednego Urala* [Ecological peculiarities and regeneration dynamics of dark coniferous forests of the Middle Urals]. Sverdlovsk, Ural Branch of the USSR Academy of Sciences Publ., 1991, 127 p. (In Russian)
18. Dancheva A.V., Zalesov S.V., Mukanov B.M. Influence of climatic factors on radial growth of trees in pine forests of Kazakh Upland. *International Research Journal*, 2020, vol. 93, no. 3, pp. 68–76. (In Russian) <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.93.3.010>
19. Dauškanė I., Elferts D. Influence of climate on Scots pine growth on dry and wet soils near Lake Engure in Latvia. *Estonian Journal of Ecology*, 2011, vol. 60, no. 3, pp. 225. <https://doi.org/10.3176/eco.2011.3.05>
20. Edvardsson J., Rimkus E., Corona Ch., Šimanauskienė S., Kažys J., Stoffel M. Exploring the impact of regional climate and local hydrology on *Pinus sylvestris* L. growth variability – A comparison between pine populations growing on peat soils and mineral soils in Lithuania. *Plant and Soil*, 2015, vol. 392, no. 1–2, pp. 345–356. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2466-9>
21. Shiyatov S.G. *Dendrokronologiya, ee printsipy i metody* [Dendrochronology, its principles and methods]. Sverdlovsk, Ural Scientific Center of the USSR Academy of Sciences Publ., 1973. (In Russian)
22. Rozhkov L.N. Annual carbon dioxide absorption of pine stands in relation to age. *Trudy BGU. Seria 1, Lesnoe khozyaistvo, prirodopol'zovanie i pererabotka vozobnovlyаемых ресурсов* [Proceedings of BSTU. Series 1, Forestry, Nature Management and Processing of Renewable Resources]. 2020, vol. 234, no. 2, pp. 64–68. (In Russian)
23. Lukina N.V., Smirnov V.E., Tebenkova D.N., Danilova M.A., Tikhonova E.V. et al. Role of old-growth forests in carbon accumulation and storage. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*, 2023, vol. 87, no. 4, pp. 536–557. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S2587556623040064>
24. Luyssaert S., Schulze E.D., Börner A., Knohl A., Hessenmöller D. et al. Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature*, 2008, vol. 7210, no. 455, pp. 213–215. <https://doi.org/10.1038/nature07276>

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Дарья А. Литовченко собрала эмпирические данные, провела анализ климатических и дендрохронологических данных, написала рукопись.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Daria A. Litovchenko collected empirical data, analyzed climatic and dendrochronological data, and wrote the manuscript. Sergey S. Sheshnitsan analyzed and interpreted

Сергей С. Шешнищан проводил анализ и интерпретацию данных, подготовил рисунки и корректировал рукопись до подачи в редакцию. Наталия В. Яковенко корректировала рукопись до подачи в редакцию. Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

data, prepared figures, and proofread the manuscript before submission to the editorial board. Natalia V. Yakovenko proofread the manuscript before submission to the editorial board. All authors are equally responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Дарья А. Литовченко / Daria A. Litovchenko <http://orcid.org/0000-0003-2973-7447>

Сергей С. Шешнищан / Sergey S. Sheshnitsan <http://orcid.org/0000-0002-8027-855X>

Наталия В. Яковенко / Natalia V. Yakovenko <https://orcid.org/0000-0003-4203-0040>