

Научная статья
УДК 630*18

КЛИМАТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК В ПРИРОСТЕ МОЛОДНЯКОВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ ПРИ ПРОМЫШЛЕННОМ ЗАГРЯЗНЕНИИ

Светлана Юрьевна Бахтина¹, Руслан Юлаевич Янбаев²,
Алексей Юрьевич Кулагин³, Юлай Аглямович Янбаев⁴

^{1, 2} Башкирский государственный аграрный университет, Уфа, Россия

^{3, 4} Уфимский институт биологии Уфимского федерального
исследовательского центра РАН, Уфа, Россия

¹ svetlana.bakhtina@inbox.ru

² ruslan.yanbaev@list.ru

³ coolagin@list.ru

⁴ Yanbaev_ua@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты анализа климатического отклика в линейном приросте сосны обыкновенной на территории Учалинского горно-обогатительного комбината. Параметр в семи изученных выборках изменялся от 8,7 до 65,9 см. Выявлены месяцы, критичные для роста и влияние на это степени сомкнутости молодняка.

Ключевые слова: промышленное загрязнение, климатический отклик, сосна

Благодарности: работа была проведена в рамках реализации грантов Президента Российской Федерации на государственную поддержку молодых российских ученых МК-3699.2022.5 (Р. Ю. Янбаев и С. Ю. Бахтина) и Министерства образования и науки Республики Башкортостан НОЦ-РМГ-2021 «Создание методологических основ оценки баланса парниковых газов и определении потенциала депонирования углерода в экосистемах», выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования «Агидель» в рамках плановых исследований по бюджетной теме № 123020700152–5 FMRS-2023–0008 «Устойчивость лесообразующих древесных видов и эколого-биологические адаптации с учетом антропогенной трансформации ландшафтно-природных комплексов» (Ю. А. Янбаев, А. Ю. Кулагин, С. Ю. Бахтина).

Scientific article

CLIMATIC RESPONSE IN THE INCREMENT OF SCOTS PINE YOUNG TREES UNDER INDUSTRIAL POLLUTION

Svetlana Yu. Bakhtina¹, Ruslan Yu. Yanbaev², Aleksey Yu. Kulagin³,
Yulay A. Yanbaev⁴

^{1, 2} Bashkir State Agrarian University, Ufa, Russia

^{3, 4} Ufa Institute of Biology, Ufa Federal Research Center, Ufa, Russia

¹ svetlana.bakhtina@inbox.ru

² ruslan.yanbaev@list.ru

³ coolagin@list.ru

⁴ Yanbaev_ua@mail.ru

Abstract. Analysis of the climatic response in the Scots pine linear increment near the Uchalinsky Mining and Processing Plant is presented. The parameter varied within 8.7–65.9 cm in the 7 samples studied. The critical months have been identified, as well as the effects of the crown closures.

Keywords: industrial pollution, climate response, pine

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the grants' implementation of the President of the Russian Federation for state support of young scientists MK-3699.2022.5 (Yanbaev R. & Bakhtina S.), and the Ministry of Education and Science of the Republic of Bashkortostan REG-RMG-2022 "Creation of methodological foundations for evaluating of greenhouse gases balance and determining the carbon sequestration potential in ecosystems" (Yanbaev Y. & Kulagin A.).

Отходы горнодобывающей промышленности, включающие тяжелые металлы, из-за своей токсичности наносят существенный вред здоровью и жизнедеятельности человека [1]. Открытые горные разработки представляют наглядное доказательство такого изменения природной среды и наносимого вреда всем ее компонентам [2]. Естественное возобновление древесных растений является одним из возможностей аккумуляции экотоксикантов и разрыва их участия в кругообороте веществ [3]. Возможность этого зависит от состояния древесных пород, триггером чего, кроме созданных человеком экстремальных лесорастительных условий, является ускоряющееся изменение климата [4]. Существуют разнообразные лабораторные и полевые способы определения успешности роста и развития деревьев в экологически экстремальных условиях. В их число входит величина годичного прироста деревьев, являющаяся объективным, сравнительно недорогим и доступным для изучения в полевых условиях показателем [3]. Для подростка и молодняка хвойных древесных видов таким легко измеряемым признаком является

линейный прирост, измерение которого сводится к определению ежегодно образуемых мутовок главного стебля.

Целью проведенной работы является анализ климатического отклика в приросте молодняка сосны обыкновенной в техногенной зоне Учалинского горно-обогатительного комбината (УГОК). Предприятие является одним из ведущих поставщиков концентрата медно-колчеданных руд металлургической отрасли России [2], в результате чего образовало техногенно трансформированные ландшафты на 1252 га. В настоящее время на северной и восточной окраинах техногенной зоны комбината наблюдается интенсивно лесовозобновление сосной обыкновенной.

На этих территориях нами сформированы семь выборок растений 20–25 лет (по 15 в каждой), представляющих две группы. Первая из них представляет сомкнутый молодняк (выборки обозначены 1Мз, 2Мз, 3Мз и 4Мз), различающийся по степени удаления от промышленных отвалов (от их подножия до 1,5 км) и нарушенности почвенного слоя. Вторая группа несомкнутого молодняка (5Мз, 6Мз и 7Мз) включает растения, произрастающие на склонах отвалов вскрышных пород – на субстратах, крайне гетерогенных по мощности почвогрунтов, по водным, физическим и химическим составляющим лесорастительных условий. У каждого растения с помощью мерной ленты измерен линейный прирост с точностью до 1 см. Среднемесячные значения осадков и температуры воздуха в 2009–2013 гг. были получены в региональном Башкирском управлении по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды для метеостанции г. Учалы.

Этот период исследования был выбран по двум причинам. Во-первых, за этот отрезок времени были зафиксированы наиболее контрастные различия двух последних десятилетий по количеству осадков. Большая часть осадков выпала летом, за исключением 2010 г., когда за сезон было всего 73,2 мм дождей. Но дожди были аномально высокими в течение летних периодов 2011 и 2013 гг. (107,5, и 136,0 мм соответственно, при 24,4–60,8 в остальные три года). При этом годовые и сезонные температуры изменялись в течение 60 месяцев без экстремальных годовых значений. Во-вторых, растения в исследованном 12–16-летнем (2009–2013 гг.) возрасте еще мало конкурировали друг с другом за доступ к солнечному свету из-за отсутствия смыкания их крон в тот период времени. Оба этих подхода позволяли рассчитывать на лучшее выявление климатического сигнала в приросте сосны обыкновенной.

Для описательного и корреляционного анализов использовалась программа *STATISTICA* 13.3. После предварительной проверки распределений данных по критерию Шапиро-Уилка и подтверждения факта их небиномиального характера, для сравнения значений климатических параметров и годового прироста деревьев был выбран рекомендуемый в этих случаях

коэффициент корреляции Спирмена R. Кроме корреляционного анализа, вычислялись параметры описательной статистики – средняя, ее ошибка, медиана, пределы изменения признаков, коэффициент вариации. Статистическая значимость различий средних величин определялась с применением критерия χ^2 .

В выборках сомкнутого молодняка линейный прирост растений статистически значимо ($p < 0,05$) уменьшался по мере приближении к отвалам вскрышных пород (табл. 1) от 1Мз и 2Мз к 3Мз и 4Мз. Однако маловероятно, что причиной этого является градиент загрязнения тяжелыми металлами – содержание этих экотоксикантов сравнительно равномерно в пределах исследованной нами территории [6]. В то же время между этими двумя парами существуют относительно большие различия в мощности почвенного покрова и почвогрунтов.

Анализ связи прироста с климатическими показателями (табл. 2 и 3) показал разные реакции на динамику месячных величин температуры и количества осадков у сомкнутых и несомкнутых молодняков.

Таблица 1

Годичный линейный прирост молодняка сосны обыкновенной
в 2009–2013 гг. в техногенной зоне УГОК (в см)

№	Годы прироста					Среднее	M, см	C, %
	2009	2010	2011	2012	2013			
Сомкнутые молодняки у подножья промышленных отвалов								
1Мз	53,0 ± 6,7	53,5 ± 3,5	69,5 ± 4,7	67,0 ± 2,4	79,3 ± 1,7	64,5 ± 2,8	64,5	19,7
2Мз	54,8 ± 6,6	54,0 ± 6,1	70,0 ± 7,8	74,7 ± 4,0	76,0 ± 4,7	65,9 ± 3,2	64,5	22,0
3Мз	38,5 ± 9,6	39,0 ± 4,8	38,5 ± 9,9	42,2 ± 6,5	56,5 ± 4,4	43,0 ± 3,3	43,0	34,8
4Мз	37,2 ± 2,7	35,5 ± 2,5	34,2 ± 2,4	40,5 ± 3,0	41,8 ± 2,8	37,9 ± 1,2	37,0	14,7
Несомкнутые молодняки на промышленных отвалах								
5Мз	15,6 ± 2,6	14,1 ± 2,1	13,4 ± 2,7	14,6 ± 2,9	15,9 ± 2,9	14,7 ± 1,1	12,2	55,2
6Мз	11,7 ± 2,2	11,2 ± 1,3	11,5 ± 1,7	12,2 ± 1,6	14,6 ± 2,3	12,2 ± 0,8	11,5	47,4
7Мз	8,9 ± 0,8	8,0 ± 1,4	8,2 ± 1,2	9,8 ± 2,5	8,7 ± 1,2	8,7 ± 0,7	8,3	53,4

Примечание. № – обозначения выборок, М – медиана, С – коэффициент вариации.

В целом, результаты повторяют те же тренды, обнаруженные при изучении динамики прироста в пространстве (см. табл. 1). В первой группе важными (в том числе на статистически достоверном уровне) оказались температуры ноября и декабря предыдущего года, а также марта и апреля года прироста. На этот параметр выраженным было воздействие количества осадков ноября предыдущего года, а также периода с февраль по июль

текущего года. При этом влияние изученных климатических факторов в критические месяцы на линейный прирост являлось как положительным, так и отрицательным. В несомкнутых молодняках (5–7 Мз) коэффициенты Спирмена по всем месяцам были близки к нулю.

В связи со сходством возраста изученных растений, риск влияния на их рост возрастного тренда был минимальным. Кроме того, одиночное произрастание молодняка на склонах отвалов позволяет пренебречь влиянием конкуренции за доступ к свету [7]. Следовательно, отсутствие корреляции между климатическими переменными и линейным приростом в выборках несомкнутого молодняка нельзя объяснить этими причинами. С другой стороны, отсутствие климатического отклика в выборках 5–7 Мз совпадает с крайне низкими значениями линейного прироста, возможно, вызванными низкой обеспеченностью питательными веществами и особой экстремальностью лесорастительных условий склонов отвалов вскрышных пород. Экологическими различиями местообитаний, вероятно, можно объяснить случаи разной критичности климатических условий отдельных месяцев для одного и того же месяца (например, количество осадков марта для выборок 1Мз и 4Мз).

Таблица 2

Корреляции линейного прироста молодняка сосны обыкновенной на территории УГОК и месячных температур

Месяцы	Коэффициент корреляции Спирмена						
	1Мз	2Мз	3Мз	4Мз	5Мз	6Мз	7Мз
Предыдущий год							
Сентябрь	–0,01	0,15	0,00	0,21	0,03	–0,15	0,02
Октябрь	0,08	–0,04	0,20	0,10	0,17	0,09	0,08
Ноябрь	–0,19	–0,33	–0,23	–0,47*	0,03	–0,05	0,05
Декабрь	–0,55*	–0,37	–0,50*	–0,46*	–0,02	–0,12	0,03
Текущий год							
Январь	0,04	0,00	0,08	0,01	0,12	0,04	0,13
Февраль	0,10	–0,10	0,15	–0,06	0,15	0,07	0,08
Март	–0,76***	–0,61**	–0,55	–0,57**	0,11	–0,10	0,05
Апрель	0,50*	0,56**	0,49	0,72***	0,00	0,12	–0,01
Май	–0,28	–0,04	–0,25	–0,02	–0,11	–0,07	–0,08
Июнь	–0,53	–0,33	–0,34	–0,21	0,04	–0,06	–0,02
Июль	0,07	0,24	0,06	0,30	–0,10	0,00	–0,09
Август	–0,18	–0,05	–0,03	0,12	0,05	0,01	–0,03

Примечание. Знаками *, ** и *** обозначены уровни значимости $p < 0,001$, $p < 0,001$ и $p < 0,001$, соответственно.

Таблица 3

Корреляции линейного прироста молодняка сосны обыкновенной
в районе УГОК и количества осадков

Месяцы	Коэффициент корреляции Спирмена						
	1Мз	2Мз	3Мз	4Мз	5Мз	6Мз	7Мз
Предыдущий год							
Сентябрь	–0,03	0,07	–0,29	–0,36	–0,02	–0,12	0,03
Октябрь	–0,11	0,05	0,04	0,06	0,02	0,16	–0,02
Ноябрь	–0,56*	–0,32	–0,18	0,05	–0,08	0,09	–0,05
Декабрь	–0,19	–0,36	0,09	–0,03	–0,09	0,08	–0,04
Текущий год							
Январь	0,01	–0,13	–0,04	–0,39	0,09	0,01	0,08
Февраль	0,41	0,35	0,39	0,49*	–0,09	–0,02	–0,01
Март	0,47*	0,30	0,19	–0,15	0,09	0,05	0,03
Апрель	0,78***	0,59**	0,40	0,18	–0,09	0,08	–0,04
Май	0,51	0,52*	0,08	–0,02	–0,03	0,15	–0,03
Июнь	0,70***	0,39	0,34	0,17	–0,12	0,05	–0,08
Июль	0,52*	0,30	0,34	0,43	0,03	0,11	0,03
Август	0,35	0,10	0,14	–0,22	0,12	0,11	0,07

Примечание. Знаками *, ** и *** обозначены уровни значимости $p < 0,001$, $p < 0,001$ и $p < 0,001$ соответственно.

Результаты наших исследований подтверждают, что динамика роста деревьев в техногенной среде является сложным процессом, зависящим от множества взаимодействующих биотических и абиотических факторов, включая специфические экологические условия, климат, внутри- и межвидовую конкуренцию и др. Возможно, сезонные и месячные температуры и осадки могут влиять на линейный прирост молодняка разнонаправленно и в разной степени, в зависимости от лесорастительных условий, ослабляя или усиливая влияние экстремальных температур и количества осадков. При адаптации к антропогенно трансформированным условиям среды влияние этих факторов на рост сосны обыкновенной может значительно колебаться и демонстрировать разную реакцию на изменчивость климатических факторов. Возможно, при этом могут быть задействованы механизмы структурно-функциональной адаптации растений, сформированные к природным экстремальным факторам.

Список источников

1. Soil metal concentrations and toxicity: associations with distances to industrial facilities and implications for human health Aelion C.M. [et al.] // Science of the Total Environment. 2009. V. 407. P. 2216–2223.

2. Ангелов В.А., Ангелова Е.И., Аверьянов К.А. Изучение особенностей вещественного состава хвостов обогащения медно-колчеданных руд Учалинской обогатительной фабрики // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 5. С. 362–368.

3. Техногенное загрязнение почв тяжелыми металлами и их накопление в листьях и хвое лесообразователей Предуралья / Р. Уразгильдин // Экология и промышленность России. 2022. № 26 (6). С. 60–66.

4. Scots pine's capacity to adapt to climate change in hemi-boreal forests in relation to dominating tree increment and site condition / M. Mikalajūnas [et al.] // iForest – Biogeosciences and Forestry. 2021. V. 14. P. 473–482.

5. Dobbertin M. Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review // European Journal of forest research. 2005. V. 124. P. 319–333.

6. Dynamics of annual growth of common pine on industrial dumps of mining companies / S.Y. Bakhtina [et al.] // Journal of Forestry Research. 2021. V. 32 (4). P. 1385–1393.

7. Залесов С.В. Лесоводство. Екатеринбург : Уральский государственный лесотехнический университет. 2020. 294 с.