

УДК 630

Научная специальность: 4.1.6 Лесоведение, лесоводство, лесные культуры, агролесомелиорация, озеленение, лесная пирология и таксация

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ЭКСТРЕМУМЫ И УГЛЕРОДНЫЙ БАЛАНС БОРЕАЛЬНЫХ ЛЕСОВ СИБИРИ

Смирнов Максим Викторович

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова» Санкт-Петербург, Российская Федерация

e-mail: max_smirnov_14906@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрено влияние засух, аномальной жары и лесных пожаров на продуктивность и углеродный баланс бореальных лесов Сибири. На основе официальных климатических материалов и рецензируемых исследований сопоставлены показатели продуктивности, живой надземной биомассы, мертвой древесины и углеродного баланса. Показано, что увеличение продолжительности вегетационного периода само по себе не гарантирует усиления поглощения углерода: экстремальные засухи и пожары способны компенсировать эффект повышенной продуктивности и приводить к потере живой биомассы.

Ключевые слова: бореальные леса, Сибирь, засуха, лесные пожары, углеродный баланс, продуктивность, дистанционное зондирование

CLIMATE EXTREMES AND THE CARBON BALANCE OF SIBERIAN BOREAL FORESTS

Smirnov Maxim Viktorovich

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Saint-Petersburg State Forest Technical University» St. Petersburg, Russian Federation

e-mail: max_smirnov_14906@mail.ru

Abstract. The paper examines the effects of drought, heat anomalies and wildfire on the productivity and carbon balance of Siberian boreal forests. Official climate information and peer-reviewed studies are used to compare productivity, live above-ground biomass, dead wood and carbon balance indicators. A longer growing season does not necessarily strengthen the carbon sink because severe drought and fire can offset productivity gains and reduce live biomass.

Keywords: boreal forests, Siberia, drought, wildfire, carbon balance, productivity, remote sensing.

Введение

Бореальные леса Сибири занимают огромную площадь и являются одним из крупнейших наземных резервуаров углерода. Их реакция на изменение климата принципиально важна как для лесного хозяйства России, так и для оценки обратных связей в климатической системе. Потепление способно удлинять вегетационный период и усиливать фотосинтез, однако одновременно возрастает вероятность засух, теплового стресса и крупных пожаров.

В лесной экологии все чаще фиксируется расхождение между «озеленением» по спутниковым индексам и фактическим накоплением древесной биомассы. Листовая поверхность может восстанавливаться после нарушения быстрее, чем запас живого углерода, поэтому NDVI или LAI нельзя автоматически интерпретировать как эквивалент устойчивого углеродного поглотителя [2].

Цель работы – обобщить современные оценки влияния климатических экстремумов на продуктивность и углеродный баланс сибирских бореальных лесов. Статья основана на

опубликованных наблюдениях и дистанционных оценках; собственный полевой эксперимент не заявляется.

Материалы и методы

В выборку включали исследования, где изменения лесной продуктивности или биомассы прямо соотносились с температурой, дефицитом влаги либо пожарной нарушенностью. При этом сопоставление проводилось непосредственно, без переноса акцента на косвенные индикаторы: в качестве основных переменных рассматривались валовая и чистая первичная продукция, живая надземная углеродная масса, запас мертвой древесины и итоговый углеродный баланс. Этот набор показателей задавал структуру анализа.

Для унификации терминологии опирались на разграничение запаса и потока. Запас углерода - это количество углерода в биомассе на определенный момент, тогда как баланс отражает разность между поступлением и потерями за единицу времени; тем самым различались статическая и динамическая характеристики углеродного цикла. Положительное значение баланса трактовалось как поглощение атмосферного углерода лесной экосистемой.

Для характеристики эффективности использования ассимилированного углерода применялся показатель CUE - отношение чистой первичной продукции к валовой первичной продукции. Если CUE снижался, это означало увеличение доли ассимилированного углерода, расходуемой на дыхание, причем интерпретация показателя сохраняла прямую связь между валовой и чистой первичной продукцией. Такой показатель использовался для оценки эффективности.

Результаты

Анализ пассивных микроволновых наблюдений за 2010–2019 гг. выявил почти нейтральный углеродный баланс сибирских лесов [2]. Оцененный чистый сток составлял около $+0,02 \text{ Pg C}$ в год; при этом прирост углерода в мертвой древесине в значительной степени компенсировался сокращением живой биомассы. Особенно заметные потери живого углерода были связаны с двумя событиями - пожарами северной Сибири 2012 г. и засухой в Восточной Сибири 2015 г., что отчетливо выделяло их на общем фоне десятилетия.

Этот результат важен методически: увеличение листового индекса после нарушения не означает быстрого восстановления древесного запаса. Травяно-кустарниковая растительность и молодые побеги возвращают спектральный сигнал «зелени» раньше, чем формируется многолетняя древесная масса.

На южной границе тайги повышение температуры усиливает испарительный спрос атмосферы. При ограниченных осадках возникает дефицит влаги, вызывающий закрытие устьиц, снижение фотосинтеза и гидравлический стресс деревьев. Для темнохвойных пород Прибайкалья описана засухообусловленная смертность кедра и пихты, что подтверждает чувствительность бореальных лесов не только к пожарам, но и к продолжительным аномалиям водообеспеченности [6].

Новые интегральные оценки бореального пояса за 2001–2022 гг. показывают, что рост валовой продуктивности не устраняет риск снижения эффективности использования углерода: в значительной части бореальных территорий отмечено уменьшение CUE [3]. Для Сибири это означает вероятность ситуации, при которой фотосинтетическая активность возрастает, но относительная доля углерода, остающаяся в новой биомассе, уменьшается.

Пожар одновременно переводит часть живой биомассы в атмосферные выбросы и в мертвое органическое вещество. Дальнейшее восстановление определяется несколькими условиями: повторяемостью пожаров, наличием семенного фонда, мерзлотными условиями и влагообеспеченностью. Если межпожарный интервал сокращается, древостой - вследствие недостатка времени на регенерацию - может не восстановить исходный запас углерода.

По этой причине для лесной таксации и углеродного мониторинга целесообразно совместно применять наземные запасы древесины, карты нарушений и многолетние спутниковые ряды. Такой подход объединяет разнородные источники информации; при этом один показатель состояния кроны не обеспечивает оценку долговременной устойчивости лесного углеродного стока. Для анализа здесь требуется совместное использование

нескольких типов данных - именно оно позволяет сопоставлять текущее состояние насаждений с длительной динамикой углерода.

Заключение

Климатическое потепление формирует для бореальных лесов Сибири разнонаправленные эффекты. Более продолжительный теплый сезон может повышать фотосинтетическую продуктивность, однако засухи, жара и пожары уменьшают живую биомассу и, по нашему мнению, способны переводить лес из устойчивого поглотителя в почти нейтральную систему. И это смещение - при сочетании благоприятных и дестабилизирующих факторов - задает основное противоречие в оценке современного состояния лесного углеродного баланса.

Для оценки климатической устойчивости лесов необходимо разграничивать быстрый спектральный отклик растительности и медленное восстановление древесного запаса. Наиболее надежный мониторинг должен сочетать несколько блоков наблюдений: таксационные данные, спутниковые индексы, сведения о пожарах и показатели водного стресса. Примечательно, что именно такая комбинация источников - объединяющая оперативный сигнал и инерционные характеристики древостоя - позволяет корректно отслеживать устойчивость лесов к климатическим воздействиям.

Литература

1. Roshydromet. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. Москва, 2025. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/press/news/39990/> (дата обращения: 07.10.2026).
2. Liu Z. et al. Siberian carbon sink reduced by forest disturbances // *Nature Geoscience*. – 2023. – Vol. 16. – P. 56-62. – DOI: 10.1038/s41561-022-01087-x.
3. Liang M. et al. Productivity gains fail to offset CUE decline in boreal region: Latent threats to carbon sinks under extreme climate events // *Global and Planetary Change*. – 2026. – Vol. 261. – 105400. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2026.105400.
4. Babst F. et al. Site- and species-specific responses of forest growth to climate across the European continent // *Global Ecology and Biogeography*. – 2013. – Vol. 22. – P. 706-717. – DOI: 10.1111/geb.12023.
5. Barichivich J. et al. Large-scale variations in the vegetation growing season and annual cycle of atmospheric CO₂ at high northern latitudes from 1950 to 2011 // *Global Change Biology*. – 2013. – Vol. 19. – P. 3167-3183. – DOI: 10.1111/gcb.12283.
6. Kharuk V.I. Drought-induced mortality of Siberian pine and fir in the Lake Baikal watershed, Siberia / V.I. Kharuk, K.J. Ranson, S.T. Im, P.A. Oskorbin // *Forest Ecology and Management*. – 2013. – Vol. 289. – P. 385-392. – DOI: 10.1016/j.foreco.2012.10.021.
7. Anderegg W.R.L. et al. Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests // *Science*. – 2020. – Vol. 368. – eaaz7005. – DOI: 10.1126/science.aaz7005.
8. Климатическая продукция Росгидромета. URL: <https://www.meteorf.gov.ru/product/climat/> (дата обращения: 07.10.2026).