

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ЧЕРНОГО УГЛЕРОДА И ДРУГИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЛИНЕЙНЫЕ ПРИРОСТЫ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ (*PINUS SYLVESTRIS* L.) НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПОВЕДНИКА «КИВАЧ»

О.В. Максимова<sup>1,2</sup>, А.Е. Кухта<sup>1✉</sup>, С.А. Коротков<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля» (ФГБУ «ИГКЭ»), Россия, 107258, Москва, ул. Глебовская, д. 20Б

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет МИСИС (НИТУ «МИСИС»), Россия, 119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (Мытищинский филиал), Россия, 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

<sup>4</sup>ФГБУН «Институт лесоведения Российской академии наук» (ИЛАН РАН), Россия, 143030, Московская обл., Одинцовский р-н, с. Успенское, ул. Советская, д. 21

anna\_koukhata@mail.ru

Исследовано воздействие осаджений черного углерода на приросты сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в фоновом районе — на территории государственного природного заповедника «Кивач». Для тех же древостоев выявлены отклики на кумулятивное воздействие осадков и температур предыдущего и текущего вегетационных сезонов. Используются стандартные методы измерения и анализа линейных приростов. Получены незначимые отклики приростов сосны на хроническое воздействие низких концентраций черного углерода, характерные для территорий, исключенных из хозяйственной деятельности. Для разных условий произрастания обнаружены и проанализированы сигналы кумулятивных осадков и средних температур в рядах приростов. Выявлена лимитирующая роль осадков в сухих биотопах и температур во влажных местообитаниях для сосны обыкновенной Государственного природного заповедника «Кивач».

**Ключевые слова:** сосна обыкновенная, линейный прирост, черный углерод, температура, осадки

**Ссылка для цитирования:** Максимова О.В., Кухта А.Е., Коротков С.А. Воздействие черного углерода и других климатических факторов на линейные приросты сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на территории заповедника «Кивач» // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 5. С. 48–59.  
DOI: 10.18698/2542-1468-2023-5-48-59

Исследования антропогенного воздействия изменений климата и атмосферных выпадений загрязняющих веществ на биогеоценозы являются одними из самых актуальных направлений современной экологии. В частности, внимание исследователей привлекает влияние на хвойные породы хронического атмосферного загрязнения, вызывающего изменения структурно-функциональных характеристик отдельных деревьев и древостоев, изменения структуры сообществ, нарушения в состоянии хвои, ее продолжительности жизни [1, 2].

В 2000–2020-е годы пристальное внимание ученых обращено на изучение вклада в изменение климата выбросов сажи и дыма от неполного сгорания органических веществ. Черный углерод (ЧУ) является основным компонентом сажи, которая состоит из частиц углерода с примесями и также содержит органический углерод. Этот компонент сажи является одним из самых значимых факторов воздействия на региональный климат [3–5] и представляет собой наиболее активную часть взвешенных частиц размером менее 2,5 микрон

(смесь пыли, золы, сажи, дыма, сульфатов, нитратов и других химических соединений), абсорбирующую солнечную радиацию и приводящую к излучению инфракрасной (тепловой) радиации. Таким образом, выбросы ЧУ вызывают загрязнение атмосферного воздуха и прогрев облаков. Этот эффект приводит не только к увеличению температуры окружающего воздуха, но и к изменению характера осадков в регионах [3]. При этом в процессе переноса частицы ЧУ обрастают другими соединениями, что может сильно менять их свойства, оказывая воздействие на биогеоценозы. Поэтому важно рассмотреть его влияние на биоту как обособленно, так и во взаимодействии с другими климатическими факторами. Время пребывания ЧУ в атмосфере существенно короче (недели или месяцы) в отличие от аналогичного периода для CO<sub>2</sub>, поэтому отклик климатической системы на выбросы ЧУ может проявиться достаточно быстро.

Сажа и ее компоненты являются загрязняющим веществом и наряду с иными химическими агентами оказывают негативное влияние на биологические объекты, в частности деревья. Однако несмотря на обширные отечественные

и зарубежные публикации, посвященные воздействию различных загрязнителей на растения, вопрос о характере влияния сажи на дендрофлору освещен крайне слабо, хотя эти частицы субмикронного диапазона составляют важную часть выбросов от промышленных источников, выхлопных газов автотранспорта и лесных пожаров [6, 7].

Пылевидные частицы сажи не обладают высокой реакционной способностью и являются рН-нейтральными, однако оказывают негативное физическое воздействие на листовую аппарат растений, образуя чехол, препятствующий нормальному тепло- и влагообмену листа с атмосферой и уменьшающий доступ света к растению (последний фактор вызывает повышение температуры запыленных листьев на 1...1,50 °С). Следствием этого процесса будет возникновение водного дефицита у растений. Зарегистрированы и столь важные для лесных экосистем последствия, как снижение продуктивности фотосинтеза [8, 9]. У всех исследованных видов наблюдается деструкция кутикулы, эпидермы и гиподермы. Крупнодисперсные вещества забивают устьица и проникают в мезофилл прежде всего через устьица и разрыхленный слой кутикулы, а также между клетками эпидермы и гиподермы [10]. Анализ анатомических признаков хвои деревьев, подверженных выпадениям твердых аэрозолей, в том числе сажи, выявил, что в условиях техногенного стресса наблюдаются изменения структурных элементов листового аппарата. Так, у представителей хвойных пород в пределах г. Горно-Алтайска уменьшалась площадь смоляных каналов [11]. Отмечено снижение активности ферментов березы повислой, клена ясенелистного, тополя черного и яблони ягодной в ряде станций Западной Сибири [7].

Рассмотренные эффекты характерны для импактного уровня загрязнения, наблюдаемого в локальных масштабах непосредственно в зонах влияния источников выбросов химических агентов. В то же время исследования воздействия ЧУ на фитоценозы на фоновых — региональном или глобальном — уровнях не проводились. Как известно, концентрация и выпадения химических веществ, поступающих с дальним и трансграничным переносом на изучаемые территории, характеризуются малыми величинами. Однако последствия для живых организмов возможны и вследствие низкоуровневых (хронических) воздействий [12]. Ни отечественные, ни зарубежные исследователи до настоящего времени не уделяли внимания оценке хронического воздействия низких концентраций ЧУ на фитоценозы, равно как и значению его как климатического фактора для растительности.

В отличие от черного углерода роль осадков и температур в изменении состояния древостоев изучена более подробно. В частности, отмечена прямая зависимость развития и продуктивности растительных сообществ (в особенности бореальных экосистем) от климатических факторов [13–16]. Решению проблемы выявления тенденций и прогнозирования состояния бореальных лесных биогеоценозов при изменении климатической системы Земли посвящены отечественные и зарубежные работы [17–19].

Проведенные нами исследования показали, что в большинстве случаев приросты в высоту сосны обыкновенной в значительной степени зависят от межгодовых вариаций температуры и осадков. При этом наиболее тесные зависимости приростов и их вариабельности отмечены для популяций, произрастающих в местообитаниях, расположенных на краях экологической ниши данной породы, и характерны для сумм осадков текущего и предыдущего вегетационных сезонов [13–15, 18–21].

### Цель работы

Цель работы — оценка отклика древостоев сосны обыкновенной на удельное осаждение выбросов черного углерода на фоновом уровне, а также на воздействие суммарных осадков и температуры предыдущего и текущего вегетационных сезонов.

**Регион исследований.** Измерения проводились в 2004 г. на территории ФГБУ «Государственный природный заповедник «Кивач» (62°15′–62°22′ с. ш., 33°47′–34°03′ в. д.) (далее — заповедник «Кивач»). Согласно климатическому районированию Б.П. Алисова, рассматриваемая территория входит в Атлантико-Арктическую область умеренного пояса [22].

Флора заповедника «Кивач» имеет таежный облик с элементами бореального, гипоарктического, неморального и арктоальпийского флористических комплексов. В урочищах сельгового комплекса с максимальными высотами до 200 м н. у. м., на выходах коренных пород доминирует сосна обыкновенная. Вниз по склону, по мере увеличения мощности почвенного слоя сосняки лишайниковые сменяются зеленомошными брусничными, затем разнотравно-черничными зеленомошными, а у подножия склонов — сложными сосняками с участием ели и с сибирскими и неморальными элементами. В лощинах и понижениях рельефа формируются сфагновые сосняки. Болота занимают около 7 % территории, большинство из них — олиготрофные и эвтрофно-мезотрофные. На верховых болотах преобладают сфагновые, багульниковые и багульничково-кассандровые сосняки с карликовой березой.

Согласно Л.С. Бергу [23], средообразующими факторами в бореальных биогеоценозах наряду с гумидным климатом являются микро- и мезорельеф местности, которыми обусловлены мозаичность местообитаний и многообразие условий произрастания. В соответствии с классической типологией В.Н. Сукачева [24], в бореальных экосистемах выделены три основных типа местообитаний (биотопов): 1) влажные биотопы — сосняки сфагновые (*Pineta sylvestris fruticuloso-sphagnosa*); 2) свежие биотопы — сосняки зеленомошные с примесью ели европейской, березы повислой, рябины обыкновенной (*Pineta fruticuloso-hylocomiosa*); 3) сухие биотопы — сосняки лишайниковые.

## Материалы и методы

Согласно проведенным ранее исследованиям климатический сигнал в рядах линейных приростов сосны *P. sylvestris* зависит от типа местообитания [15, 20, 21]. В настоящей работе отклики линейных приростов на воздействие климатических факторов также рассматривались отдельно для каждого типа биотопа: свежего, влажного и сухого [15, 18, 21].

Для оценки эффектов черного углерода и климатических параметров на древостой сосны были использованы результаты измерений линейных приростов (т. е. годовых приростов междуузлий) подростка, молодняка и приспевающих деревьев сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., 1753 (класс *Pinopsida*, порядок *Pinales*, семейство *Pinaceae*).

Измерения линейных приростов проводились в 2004 г. по методике, представленной в работах [14, 18, 19]. Деревья указанных возрастных классов в рассматриваемых бореальных фитоценозах не превышают 2 м в высоту. Пробные площади, каждая радиусом по 10 м, были заложены маршрутным методом в свежих (13 пробных площадей), сухих (3 пробных площади) и влажных (9 пробных площадей) местообитаниях (всего 25 пробных площадей). На каждой пробной площади случайным образом отбирали и измеряли по пять деревьев одного класса возраста без видимых повреждений. Было измерено 125 деревьев. У выбранных экземпляров определяли размеры междуузлия стволика/ствола начиная с верхнего и до последнего четко различимого над корневой шейкой. В результате этих измерений получен архив за период с 1974 по 2004 гг.

Ряды линейных приростов индексировались, т. е. из них удалялась возрастная компонента, для чего значение линейного прироста за каждый год делилось на значение точечной аппроксимирующей функции за текущий год. Следствием такой процедуры служили динамические ряды

индексов приростов, для которых становилось возможным проведение сравнения биометрических показателей деревьев разного возраста на воздействие факторов внешней среды [14, 18, 19]. Для анализа изменчивости индексов прироста и их связи с метеофакторами проводилось усреднение индексов по всем деревьям площадок указанного биотопа за каждый год.

Метеоданные, используемые в настоящей работе, получены с сайта ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» (<http://meteo.ru/data/158-total-precipitation>) на метеорологической станции Петрозаводск (синоптический номер: 22820). Длина рядов метеоданных соответствует длине наблюдений за линейным приростом (общий период для серий после проведения процедуры индексации составляет 27 лет — с 1976 по 2002 гг.). Для исследования связи прироста со средними значениями температуры, суммарными осадками и выбросами ЧУ выбирали периоды с апреля по сентябрь предшествующего вегетационного сезона и с апреля по май текущего. Первый период соответствует фазе развития почки возобновления, второй — фазе роста междуузлий. Как указано выше, более ранними исследованиями выявлено, что характер отклика линейного прироста сосны *P. sylvestris* на воздействие климатических факторов зависит от типа местообитания [15, 20, 21]. В настоящей работе воздействие климатических факторов на индексы линейных приростов также рассматривались отдельно для каждого типа биотопа: свежего, влажного и сухого.

Для получения оценок выбросов ЧУ за период 1980–2002 гг. воспользовались международной базой данных о выбросах, составленной группой экспертов для экспериментов проекта взаимного сравнения глобальных климатических моделей CMIP6: CEDS (CEDS — A Community Emissions Data System — A Community Emissions Data System), модель input4MIPs.CMIP6.CMIP.PNNL-JGCRI.CEDS-2017-05-18 и модель VUA-CMIP-BB4CMIP6-1-2. Российская база данных оценки выбросов, собранная для разработки Национального кадастра антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом [25], ведется ФГБУ «ИГКЭ» лишь с 1990 г. База данных CEDS для получения сводных оценок ежегодных выбросов аккумулирует существующие кадастры выбросов, коэффициенты выбросов и данные о деятельности по стране, сектору и типу выброса [26]. Данные базы CEDS не включают открытое сжигание, например, лесные и пастбищные пожары, а также сжигание сельскохозяйственных отходов на полях, данные об обороте парка транспортных средств и ухудшении контроля выбросов или технологии сжигания

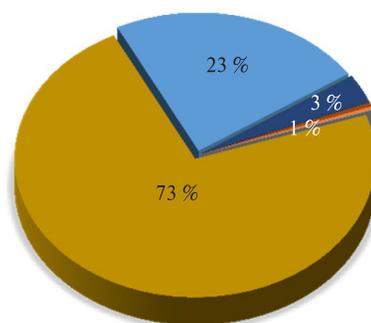
нескольких видов топлива, которые включены в более подробные реестры [27].

Для оценки выбросов от открытого сжигания биомассы (леса, пастбища, сжигание сельскохозяйственных отходов на полях, торфяники) использовались данные модели VUA-CMIP-BB4CMIP6-1-2 (CEDS — A Community Emissions Data System) [28]. Данные по выбросам ЧУ в рассматриваемых базах представлены файлами формата NetCDF (Network Common Data Form) и находятся в свободном доступе. Данные привязаны к географической сетке, в узлах которой задана средняя интенсивность выброса ЧУ ( $\text{кг/с м}^2$ ): сетка  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  для базы данных CEDS, сетка  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  для выбросов от открытого сжигания биомассы модели VUA-CMIP-BB4CMIP6-1-2. Для работы с файлами такого типа использовалось программное обеспечение Panoply (version 5). Для расчета годовых показателей суммировались ежемесячные данные в каждой ячейке географической сетки с последующим усреднением по ячейкам, накрывающим территорию заповедника «Кивач». В итоге полученные значения приводились к удельным показателям осаждения за год ( $\text{кг/м}^2$ ).

Оценка связи между климатическими факторами и индексами линейных приростов междуузлий сосны проводилась с использованием коэффициента корреляции Пирсона ( $r$ ) с оценкой значимости по критерию Стьюдента на уровне  $\alpha = 0,1$ . Для проведения корреляционно-регрессионного анализа временных рядов и статистического оценивания [29, 30] использовался программный модуль Statistica 15 и пакет Excel 2016.

## Результаты и обсуждение

Первичный анализ осаждений выбросов ЧУ на территории заповедника «Кивач» по отдельным категориям источников (рабочие секторы с классификаций, представленной в международной базе CEDS представлены в документе: <https://gmd.copernicus.org/articles/11/369/2018/gmd-11-369-2018.pdf> (дата обращения 07.12.2022) показывает, что наибольший вклад имеют выбросы от сектора транспорт (рис. 1) [31]. В динамике осаждений ЧУ по территории заповедника «Кивач» за 1980–2002 гг. по категориям источников наблюдаются изменения к снижению (рис. 2). Для суммарного воздействия от всех категорий источников коэффициент детерминации линейной регрессии (показывающий долю обусловленной изменчивостью включенным фактором от общей вариации зависимой переменной) для временного ряда удельных годовых осаждений ЧУ значим и составляет  $R^2 \approx 0,86$ , тренд нисходящий (см. рис. 2). В ходе сбора данных по выбросам ЧУ выявлено, что его осаждения от пожаров (т.е. от

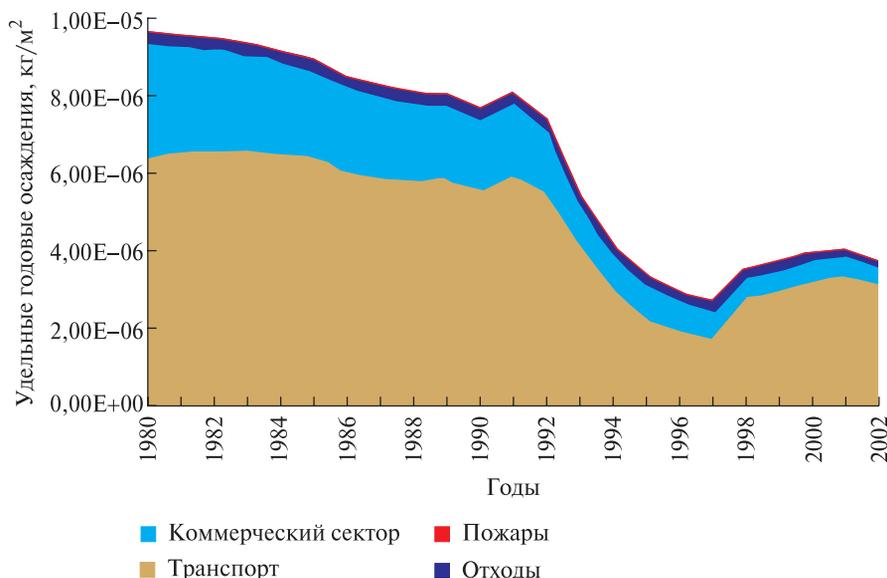


**Рис. 1.** Вклад отдельных категорий источников в суммарные оценки осаждения черного углерода за период 1980–2002 гг. по территории заповедника «Кивач»

**Fig. 1.** Contribution of individual source categories to total black carbon deposition estimates for the period 1980–2002 on the territory of the reserve «Kivach»

открытого сжигания биомассы) предпочтительно сосредоточены в центральной части заповедника. Вероятно, это связано с размещением центральной усадьбы и зоны частичного хозяйственного использования поблизости от центра ООПТ и доступности территории для рекреации, и, следовательно, с повышением уровня пожароопасности.

Для осуществления оценки вклада каждого климатического фактора в изменчивость (которая является показателем отклика и характеризует климатический сигнал) линейных приростов сосны обыкновенной необходимо исследовать эти факторы на независимость [29]. Черный углерод может оказывать воздействие по трем основным направлениям: прямое поглощение солнечной радиации, загрязнение облаков и изменение количества осадков в регионах, где облака загрязнены. При этом ЧУ имеет непродолжительное время пребывания в атмосфере (от недель до месяцев). Поэтому прежде чем независимо оценивать воздействие каждого фактора на приросты сосны, важно изучить наличие связи (мультиколлинеарность (multicollinearity) — наличие линейной зависимости между объясняющими переменными) удельных годовых осаждений выбросов ЧУ со средними значениями температуры воздуха и суммарными осадками текущего года (табл. 1). Для удельных осаждений выбросов ЧУ не получено значимых корреляций с температурами вегетационного периода текущего года. В то же время суммарные осадки и средние температуры июня — июля текущего года находятся в статистически значимой связи в период 1980–2002 гг. ( $r = -0,43$ ). Известно, что средние сезонные температуры воздуха и осадки коррелируют слабо,



**Рис. 2.** Годовые оценки осаждения выбросов черного углерода за период 1980–2002 гг. по территории заповедника «Кивач» по отдельным категориям источников  
**Fig. 2.** Annual black carbon deposition estimates for the period 1980–2002 on the territory of the reserve «Kivach» for certain categories of sources

Т а б л и ц а 1

**Корреляции между климатическими факторами: суммарные осадки и средние температуры прошлого и текущего года и удельными осаждениями выбросов черного углерода по территории заповедника «Кивач» за 1980–2002 гг.**

**Correlations between climatic factors: total precipitation and average temperatures of the past and current year and specific precipitation of BC emissions on the territory of the «Kivach» reserve for 1980–2002**

Коэффициенты корреляции с суммарными осадками	Коэффициенты корреляции со средними температурами		
	Июнь — июль текущего года	Апрель — сентябрь прошлого года	Июнь — сентябрь прошлого года и апрель — май текущего года
Июнь — июль текущего года	<b>-0,43</b>	0,12	0,14
Апрель — сентябрь прошлого года	0,14	-0,06	-0,19
Июнь — сентябрь прошлого года и апрель — май текущего года	0,05	0,01	-0,20

*Примечание.* Полу жирным в таблице отмечены значимые коэффициенты корреляции.

так как вегетационные сезоны по режиму температуры и осадков очень сильно различаются между собой. Поэтому эта корреляция, скорее всего, обусловлена случайными факторами.

Согласно проведенным расчетам, коэффициент корреляции за июнь — июль текущего года между удельными осаждениями выбросов ЧУ и суммарными осадками составил  $-0,05$ ; между удельными осаждениями выбросов ЧУ и средними температурами был равен  $-0,05$ .

Дополнительно выявлено, что средние температуры воздуха по территории заповедника «Кивач» обнаруживают за период 1980–2002 гг. статистически значимый восходящий тренд ( $R^2 \approx 0,65$ ), в отличие от суммарных годовых осадков ( $R^2 \approx 0,01$ ). Наиболее вероятно, это связано с общей тенденци-

ей глобального потепления вследствие выбросов парниковых газов, оказывающих пролонгированное воздействие на климат. Данную тенденцию важно будет учесть при интерпретации связи средних температур с индексами линейных приростов во времени, так как отсутствие значимой пространственной корреляции между ними еще не означает отсутствия их временной синхронности [15, 20]. Также можно выдвинуть гипотезу, о том, что на фоновом уровне значимая связь осаджений ЧУ и сумм осадков не обнаруживается.

Проведенный анализ взаимозависимости климатических факторов дает возможность особенно анализировать воздействие суммарных осадков и средних температур на приросты сосны в различные вегетационные периоды, кроме периода

**Корреляционная таблица кумулятивных связей климатических факторов (средних температур и суммарных осадков) и индексов приростов *P. sylvestris* в разных типах местообитаний по территории заповедника «Кивач» за 1980–2022 гг.**

**Correlation table of cumulative relationships of climatic factors (average temperatures and total precipitation) and increment indices of *P. sylvestris* in different types of habitats on the territory of the «Kivach» reserve for 1980–2022**

Климатический параметр	Период	Тип биотопа		
		Свежий	Сухой	Влажный
Средние значения температуры	Июнь — июль текущего года	0,10	–0,02	<b>–0,45</b>
	Апрель — сентябрь прошлого года	0,10	–0,15	<b>0,41</b>
	Июнь — сентябрь прошлого и апрель — май текущего года	0,03	–0,05	<b>0,32</b>
Суммарные осадки	Июнь — июль текущего года	0,07	–0,15	<b>0,32</b>
	Апрель — сентябрь прошлого года	0,17	<b>0,43</b>	–0,16
	Июнь — сентябрь прошлого и апрель — май текущего года	0,14	<b>0,49</b>	–0,09

*Примечание.* Полу жирным в таблице отмечены значимые коэффициенты корреляции.

июнь — июль текущего года (ввиду значимой связи между этими факторами), а также независимо оценить связь индексов линейных приростов с осадками ЧУ (табл. 2).

Коэффициенты корреляции между годовыми удельными осадками выбросов ЧУ и индексами линейных приростов *P. sylvestris* по территории заповедника «Кивач» за 1980–2022 гг. были равны в свежих биотопах –0,14, в сухих биотопах 0,15, во влажных биотопах –0,04.

Представленные результаты корреляционного анализа значений удельных осадками выбросов ЧУ и индексов линейных приростов сосны показывают отсутствие статистически значимых связей данных показателей во всех типах местообитаний. Проведенные ранее на сети стационаров Международной совместной программы комплексного мониторинга влияния загрязнения воздуха на экосистемы (МСП КМ) под эгидой Конвенции по трансграничному переносу загрязнений на большие расстояния Экономической комиссии ООН для Европы (<http://www.igce.ru/performance/international/icp-im/>) исследования показали, что поступающие в фоновые районы с атмосферным переносом химические соединения характеризуются малыми концентрациями. Места размещения указанных стационаров, находящихся в пределах ООПТ, являются фоновыми и служат эталоном ненарушенных лесных экосистем. Химические вещества, поступающие с трансграничным переносом на изучаемую нами территорию в малых количествах, не оказывают значимого негативного воздействия на экосистемы заповедника «Кивач» [32].

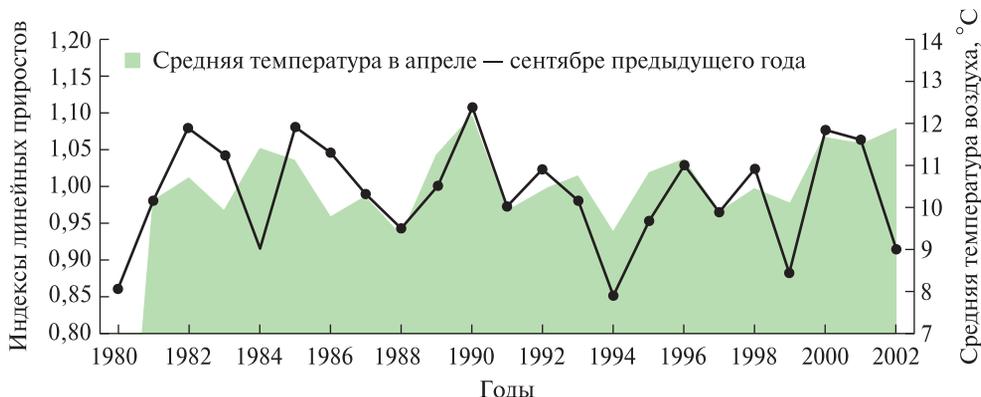
В то же время известно, что климатические факторы — температура воздуха и осадки оказывают существенное воздействие на рост и раз-

витие деревьев, в частности на сосну *P. sylvestris*, что отражено в работах [13–17, 33, 34].

Анализ табл. 2 дает следующие результаты. Во влажных биотопах обнаруживаются статистически значимые связи со средними температурами в период апрель — сентябрь ( $r = 0,41$ ) прошлого года и кумулятивный положительный эффект от средних температур периода июнь — сентябрь прошлого и апрель — май текущего года ( $r = 0,32$ ).

Для наибольшего из полученных коэффициентов корреляции для влажных биотопов (–0,45), рассмотрим синхронность соответствующих переменных во времени (рис. 3). Оба ряда данных синхронны. Для установления статистической значимости их сонаправленности воспользуемся *G*-критерием знаков [30]. Основная гипотеза этого критерия касается случайного совпадения одинаковых направлений, а конкурирующая — не случайного. Согласно критерию, проводится расчет несовпадений промежутков синхронности признаков, поэтому чем меньше несовпадений в монотонности признаков, тем достовернее совпадение синхронности. Для нашего случая имеем незначимое число несовпадений, поэтому синхронность рядов признается неслучайной. Таким образом, во влажных биотопах не только связь, но и синхронность со средними температурами прошлогоднего вегетационного периода признаются статистически значимыми для территории заповедника «Кивач».

Обнаруженная синхронность динамики линейных приростов и температур предыдущего вегетационного сезона, совместно с полученным значимым положительным коэффициентом корреляции ( $r = 0,41$ ) для периода апреля — сентября прошлого года (см. табл. 2), подтверждает



**Рис. 3.** Ход средней температуры (апрель — сентябрь предыдущего года, °C) и индексов линейных приростов влажных биотопов

**Fig. 3.** Average temperatures graph (April — September last year, °C) and linear increments indices of wet biotopes



**Рис. 4.** Зависимость индексов линейных приростов от суммарных осадков (июнь — сентябрь предыдущего года и апрель — май текущего года, мм) в сухих биотопах

**Fig. 4.** Dependence of linear growth indices on total precipitation (June — September of the previous year and April-May of the current year, mm) in dry biotopes

лимитирующую роль температур на этапе формирования почек возобновления для сосняков в сфагновых биотопах, характеризующихся холодным субстратом.

Для текущего вегетационного сезона (июнь — июль) обнаруживается значимая положительная связь с суммарными осадками ( $r = 0,32$ ) и отрицательная значимая связь со средними температурами ( $r = -0,45$ ). Полученный результат не подлежит интерпретации ввиду наличия линейной связи между осадками и температурами (см. табл. 1). Использование в таком случае коэффициента корреляции дает вводящие в заблуждение результаты. Для оценки независимого вклада каждого климатического фактора рассчитываются частные коэффициенты корреляции. За счет расчета частного коэффициента корреляции становится возможным избежать ложных выводов, так как такой коэффициент корреляции оценивает связь между двумя факторами при фиксировании третьего [29]. Для влажных биотопов в период июнь — июль текущего года получены статисти-

чески незначимые частные коэффициенты корреляции: с осадками и со средними температурами. Таким образом, очевидно, что во влажных биотопах в течение фенофазы формирования линейного прироста ни запас влаги, ни температуры не являются лимитирующими факторами.

В сухих биотопах обнаруживаются статистически значимые связи с суммарными осадками в период апрель — сентябрь ( $r = 0,43$ ) предыдущего года и кумулятивный эффект от суммарных осадков периода июнь — сентябрь предыдущего года и апрель — май текущего года ( $r = 0,49$ ). Для наибольшего из полученных (см. табл. 2) коэффициентов корреляции для сухих биотопов рассмотрим синхронность соответствующих переменных во времени (рис. 4). Визуальный анализ рис. 4 показывает синхронность кумулятивных осадков двух вегетационных сезонов и индексов линейных приростов. Аналогично проведенному анализу по влажному биотопу для  $G$ -критерия знаков в сухих биотопах получаем результаты по числу несовпадений. Следовательно, в этом случае

синхронность рядов признается случайной [30]. Таким образом, в сухих биотопах заповедника «Кивач» только связь кумулятивных осадков двух вегетационных сезонов с индексами линейных приростов сосны признается статистически значимой в отличие от синхронности.

Аналогично анализу связей для влажных биотопов периода июнь — июль текущего года для сухих биотопов получены статистически незначимые частные коэффициенты корреляции: с осадками и со средними температурами. Вероятно, это связано с тем, что при прохождении фенофазы роста междуузлий в данном типе местообитаний сосняки заповедника «Кивач» не испытывают недостатка влаги и тепла. При этом на этапе формирования почек возобновления в предыдущем вегетационном сезоне осадки представляют собой лимитирующий фактор, ограничивающий развитие приростов деревьев. Указанная закономерность подтверждает результаты, полученные нами ранее [13, 14, 18–20].

Для *свежих биотопов* не получены статистически значимые корреляции ни со средними температурами, ни с суммарными осадками текущего и прошлого вегетационных периодов.

Отсутствие значимых зависимостей параметров роста древостоев сосны в свежих биотопах подтверждают ранее полученные результаты, где этот факт объясняется характером данного типа местообитания, представляющим собой зону оптимума для этой породы, и отсутствием лимитирования по признакам влагообеспеченности и достаточности тепла на всех стадиях развития деревьев [13, 14, 18–20].

## Выводы

В результате анализа многолетних рядов линейных приростов сосны обыкновенной Государственного природного заповедника «Кивач» выявлен значимый отклик на суммы осадков и средние температуры текущего и предыдущего вегетационных сезонов.

В *сухих биотопах* обнаружена значимая положительная связь линейных приростов сосны с суммарными осадками предыдущего вегетационного сезона, дефицит которых лимитирует развитие почек возобновления и, как следствие, рост междуузлий в текущем году.

Отмечена положительная значимая корреляция линейных приростов от осадков предыдущего вегетационного сезона во *влажных биотопах*, также объясняемая лимитирующей ролью влаги в процессе развития почек возобновления. Не только связь, но и синхронность со средними температурами предыдущего вегетационного сезона признается статистически значимой для территории заповедника «Кивач». Для влажных

биотопов получен значимый положительный кумулятивный эффект температур при прохождении фенофазы формирования почки возобновления в предыдущем вегетационном сезоне и роста междуузлий в текущем сезоне.

Для *свежих биотопов* значимых корреляций не обнаружено, поскольку этот тип местообитания представляет собой зону оптимума для сосны обыкновенной в данном биоме и действие лимитирующих факторов обнаружить не удалось.

Получены незначимые отклики приростов сосны на хроническое воздействие низких концентраций черного углерода, характерных для заповедника «Кивач». Полученный результат согласуется с уже имеющимися результатами исследований реакции природных экосистем фоновых районов на различные загрязнители, поступающие в природные экосистемы вследствие регионального или глобального переноса. Подчеркнем, что установленные закономерности характерны для территории, исключенной из хозяйственной деятельности и представляющей собой эталон мало затронутых ею биогеоценозов. В подобные геосистемы загрязняющие вещества поступают, по большей части, вследствие регионального или глобального переноса. Очевидно, на импактном уровне, т. е. вблизи источников выбросов, отклики растительности на осаднения черного углерода (который может рассматриваться и как климатический, и как токсический агент) могут оказаться абсолютно иными. Следовательно, необходимо проводить дополнительные исследования, объектом которых в дальнейшем должны стать сосняки урбанизированных территорий.

*Исследование выполнено в рамках научной темы Росгидромета (ФГБУ «ИГКЭ») АААА-А20-120021090098-8 «Развитие методов и технологий расчетного мониторинга антропогенных выбросов и абсорбции поглотителями парниковых газов и короткоживущих климатически активных веществ»; НИОКТР АААА-А20-120013190049-4 «Развитие методов и технологий мониторинга загрязнения природной среды вследствие трансграничного переноса загрязняющих веществ (ЕЭК ООН: ЕМЕП, МСП КМ) и кислотных выпадений в Восточной Азии (ЕАНЕТ)».*

## Список литературы

- [1] Махнева С.Г., Меншиков С.Л. Качество пыльцы сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зоне действия выбросов АО «Карабашмедь» // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 32–44. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-32-44
- [2] Ярмишко В.Т., Игнатъева О.В., Евдокимов А.С. Некоторые аспекты мониторинга сосновых лесов в экстремальных условиях Кольского Севера // Самарский научный вестник, 2019. № 8(2). С. 81–86.

- [3] Bachmann J. «BLACK CARBON: A Science/Policy Primer» // Vision air consulting, LLC. PEW Center on Global Climate Change. December, 2009, 47 p.
- [4] Interactive comment on «Quantifying immediate radiative forcing by black carbon and organic matter with the Specific Forcing Pulse» by T.C. Bond et al. // Atmos. Chem. Phys. Discuss., 2010, v. 10, pp. 5378–5382.
- [5] Кароль И.И. Климатические аспекты черного углерода // Изменение климата. Информационный бюл. Росгидромета № 40 (февраль–март 2013 г.). URL: <https://www.meteorf.gov.ru/press/news/1372/> (дата обращения 22.12.2022).
- [6] Громцев А.Н., Левина М.С., Преснухин Ю.В. Лесные пожары в Карелии: современная ситуация на фоне естественных режимов в различных географических ландшафтах // Труды КарНЦ РАН, 2021. № 12. С. 36–45.
- [7] Еремеева В.Г., Денисова Е.С. Газоустойчивость древесных растений Западной Сибири // Сибирский экологический журнал, 2011. № 2. С. 263–271.
- [8] Денисова Е.С. Аккумуляция некоторыми сельскохозяйственными растениями техногенной пыли сажевых заводов // Омский научный вестник, 2014. № 2 (134). С. 196–199.
- [9] Лазарева Э.А., Портнов А.Н., Маркелов В.Л., Халилов Г.Х., Черенщиков А.Г. Влияние выбросов промышленности и автотранспорта на растительный покров // Современные наукоемкие технологии, 2005. № 10. С. 97–98.
- [10] Папина О.Н., Собчак Р.О., Астафурова Т.П. Влияние урбанизированной среды на покровные ткани и содержание воды в хвое видов семейства Pinaceae Lindl // Вестник Томского ГТУ. Биология, 2013. № 3 (23). С. 152–161.
- [11] Зотикова А.П., Бендер О.Г., Собчак Р.О., Астафурова Т.П. Сравнительная оценка структурно-функциональной организации листового аппарата хвойных растений на территории г. Горно-Алтайска // Вестник Томского ГТУ, 2007. № 299. С. 152–161.
- [12] Неверова О.А. Применение фитоиндикации в оценке загрязнения окружающей среды // Биосфера, 2009. № 1. С. 82–92.
- [13] Кузнецова В.В., Чернокульский А.В., Козлов Ф.А., Кухта А.Е. Связь линейного и радиального прироста сосны обыкновенной с осадками разного генезиса в лесах Керженского заповедника // Известия РАН. Серия географическая, 2020. № 1. С. 93–102. DOI: 10.31857/S2587556620010124
- [14] Кухта А.Е., Попова Е.Н. Климатический сигнал в линейном приросте сосны обыкновенной бореальных фитоценозов побережья Белого моря // Экологический мониторинг и моделирование экосистем, 2020. Т. 31. № 3–4. С. 33–45. DOI: 10.21513/0207-2564-2020-3-33-45
- [15] Максимова О.В., Кухта А.Е. Вариабельность линейных и радиальных приростов сосны обыкновенной побережья Белого моря в зависимости от условий произрастания // Экологический мониторинг и моделирование экосистем, 2022. Т. 34. № 1–2. С. 20–36. DOI: 10.21513/0207-2564-2022-3-4-20-36
- [16] Bradley R.S. Paleoclimatology. Reconstructing climates of the Quaternary. UK: Elsevier, 2015. 667 p.
- [17] Тишков А.А., Кренке-мл. А.Н. «Позеленение» Арктики в XXI веке как эффект синергизма действия глобального потепления и хозяйственного освоения // Арктика: экология и экономика, 2015. № 4. С. 28–38.
- [18] Chernogaeva G.M., Kuhlta A.E. The Response of Boreal Forest Stands to Recent Climate Change in the North of the European Part of Russia // Russ. Meteorol. Hydrol., 2018, 43(6), pp. 418–424. DOI: 10.3103/S1068373918060109
- [19] Максимова О.В., Кухта А.Е., Сулова С.Б. О стабилизации изменчивости приростов сосны обыкновенной в разных географических условиях Европейской территории России // Проблемы региональной экологии, 2023. № 1. С. 17–27
- [20] Максимова О.В., Кухта А.Е. Оценка изменения линейных приростов сосны обыкновенной Печоро-Ильчского заповедника на основе климатического прогноза температуры приземного воздуха в российской Арктике // Арктика: экология и экономика, 2022. Т. 12. № 1. С. 77–86. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-1-77-86
- [21] Koukhta A.E., Maksimova O.V. Effects of growing season climatic factors on Scots pine increment for the middle Volga region and the white sea coast // Russian Meteorology and Hydrology, 2022, v. 47, no. 1, pp. 50–58.
- [22] Алисов Б.П. Климат СССР. М.: Изд-во Московского ун-та., 1956. 128 с.
- [23] Берг Л.С. Климат и жизнь. М.: Госиздат, 1922. 157 с.
- [24] Сукачев В.Н. Избранные труды в трех томах. Т. 1: Основы лесной типологии и биогеоценологии / под ред. Е.М. Лавренко. Л.: Наука, 1972. 419 с.
- [25] Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2020 гг. М.: Изд-во ФГБУ «ИГКЭ», 2022. С. 58–61.
- [26] Hoesly R., Smith S., Feng L., Klimont Z., Janssens-Maenhout G., Pitkanen T., Seibert J.J., et al. Historical Emissions (1750–2014) – CEDS – v2017-05-18. System Grid Federation, 2017. DOI: 10.22033/ESGF/INPUT4MIPS.1241
- [27] Гинзбург В.А., Зеленова М.С., Коротков В.Н., Кудрявцева Л.В., Лытов В.М., Максимова О.В., Попов Н.В. Расчетные оценки выбросов черного углерода от приоритетных категорий источников в России // Метеорология и гидрология, 2022. № 10. С. 78–91. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-10-78-91
- [28] Van M., Margreet J.E., Kloster S., Magi B.I., Marlon J.R., Daniu A.-L., Field R.D., et al. Biomass Burning emissions for CMIP6 (vol. 1.2) // Earth System Grid Federation, 2016. DOI: 10.22033/ESGF/input4MIPS.1117
- [29] Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика. Основы эконометрики. Т. 1: Теория вероятностей и прикладная статистика. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. 656 с.
- [30] Сидоренко Е.В. Методы математической обработки в психологии. СПб.: Речь, 2000. 349 с.
- [31] Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022622573 Российская Федерация. Выбросы черного углерода по регионам Арктической зоны РФ в 2013 г.: № 2022622353; заявл. 29.09.2022; опубл. 19.10.2022 / О.В. Максимова, М.С. Зеленова, Л.В. Кудрявцева, В.М. Лытов; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля».
- [32] Кухта А.Е., Пчелкин А.В., Полещук А.М. Оценка отклика древостоев сосны и ели Центрально-Лесного государственного природного заповедника на трансграничное загрязнение воздуха методами Международной совместной программы комплексного мониторинга // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, 2018. Т. 29. № 4. С. 29–37. DOI: 10.21513/0207-2564-2018-4-29-43
- [33] Долгова Е.А., Мацковский В.В., Соломина О.Н. Дендрохронология Соловецких островов // География: развитие науки и образования, 2018. Т. 1. С. 394–398.
- [34] Dolgova E., Cherenkova E., Solomina O., Matskovsky V. Influence of the large-scale atmospheric circulation variations on spruce tree-ring growth from Solovki Islands (Russia) // Practical Geography and XXI Century Challenges, 2018, pp. 78–78.

## Сведения об авторах

**Максимова Ольга Владимировна** — канд. техн. наук, вед. науч. сотр., ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля»; доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет МИСИС (НИТУ «МИСИС»); o-maximova@yandex.ru

**Кухта Анна Евгеньевна** — канд. биол. наук, вед. науч. сотр., ФГБУ «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля»; anna\_koukhata@mail.ru

**Коротков Сергей Александрович** — канд. биол. наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), ФГБУН «Институт лесоведения Российской академии наук» (ИЛАН РАН); skorotkov@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 13.01.2023.

Одобрено после рецензирования 16.06.2023.

Принята к публикации 07.09.2023.

# BLACK CARBON AND OTHER CLIMATIC FACTORS IMPACT ON SCOTS PINE (*PINUS SYLVESTRIS* L.) LINEAR INCREMENTS IN «KIVACH» RESERVE

O.V. Maksimova<sup>1,2</sup>, A.E. Koukhata<sup>1</sup>, S.A. Korotkov<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, 20B, Glebovskaya str., 107058, Moscow, Russia

<sup>2</sup>University of Science and Technology MISIS, 4, Leninsky pr., Moscow, 119049, Russia

<sup>3</sup>BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

<sup>4</sup>Institute of Forest Science RAS, 21, Sovetskaya st., village Uspenskoe, Odintsovo district, 143030, Moscow reg., Russia

anna\_koukhata@mail.ru

The black carbon deposition effect on Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) increments in the background area, in the state nature reserve «Kivach» was studied. The responses to the cumulative precipitation and temperatures of the previous and current growing seasons impact for the same forest stands were revealed. Standard methods for linear increments measuring and analyzing were used. Insignificant responses of pine increments to the chronic impact of black carbon low concentrations, typical for territories excluded from economic activity, were obtained. For different growing conditions, the cumulative precipitation and average temperatures signals in the increment series were found and analyzed. The limiting role of precipitation in dry biotopes and temperatures in wet habitats for the Scots pine of the state nature reserve «Kivach» was revealed.

**Keywords:** Scots pine, linear growth, black carbon, temperature, precipitation

**Suggested citation:** Maksimova O.V., Koukhata A.E., Korotkov S.A. *Vozdeystvie chernogo ugleroda i drugih klimaticheskikh faktorov na lineynye prirosty sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.) na territorii zapovednika «Kivach»* [Black carbon and other climatic factors impact on Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) linear increments in «Kivach» reserve]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 5, pp. 48–59.

DOI: 10.18698/2542-1468-2023-5-48-59

## References

- [1] Makhniova S.G., Menshchikov S.L. *Kachestvo pyl'tsy sosny obyknovennoy (Pinus sylvestris L.) v zone deystviya vybrosov AO «Karabashmed'»* [Common pine (*Pinus sylvestris* L.) pollen quality in JSC «Karabashmed» emission zone]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, no. 1, pp. 32–44. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-32-44
- [2] Yarmishko V.T., Ignat'eva O.V., Evdokimov A.S. *Nekotorye aspekty monitoringa sosnovykh lesov v ekstremal'nykh usloviyakh Kol'skogo Severa* [Some aspects of pine forests monitoring in extreme conditions of the Kola North], *SNV [Samara Scientific Bulletin]*, 2019, v. (27), pp. 81–86.
- [3] Bachmann J. «BLACK CARBON: A Science/Policy Primer» // *Vision air consulting, LLC. PEW Center on Global Climate Change*. December, 2009, 47 p.
- [4] Interactive comment on «Quantifying immediate radiative forcing by black carbon and organic matter with the Specific Forcing Pulse» by T.C. Bond et al. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 2010, v. 10, pp. 5378–5382.
- [5] Karol' I.L. *Klimaticheskie aspekty chernogo ugleroda* [Climatic aspects of black carbon]. *Izmenenie klimata. Informatsionnyy byulleten' Rosgidrometa № 40 (fevral' – mart 2013 g.)* [Climate change. Roshydromet Newsletter No. 40 (February – March 2013)]. Available at: <https://www.meteorf.gov.ru/press/news/1372/> (accessed 22.12.2022).
- [6] Gromtsev A.N., Levina M.S., Presnukhin Yu.V. *Lesnye pozhary v Karelii: sovremennaya situatsiya na fone estestvennykh rezhimov v razlichnykh geograficheskikh landshaftakh* [Forest fires in Karelia: current situation against the background of natural regimes in various geographical landscapes]. *Trudy KarNTs RAN [Transactions of KarRC RAS]*, 2021, no. 12, pp. 36–45.

- [7] Eremeeva V.G., Denisova E.S. *Gazoustoychivost' drevesnykh rasteniy Zapadnoy Sibiri* [Gas resistance of woody plants in Western Siberia]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal* [Siberian Ecological J.], 2011, no. 2, pp. 263–271.
- [8] Lazareva E.A., Portnov A.N., Markelov V.L., Khalilov G.Kh., Cherenshchikov A.G. *Vliyanie vybrosov promyshlennosti i avtotransporta na rastitel'nyy pokrov* [Accumulation of technogenic dust from soot plants by some agricultural plants]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [ONV], 2014, no. 2 (134), pp. 196–199.
- [9] Lazareva E.A., Portnov A.N., Markelov V.L., Khalilov G.Kh., Cherenshchikov A.G. *Vliyanie vybrosov promyshlennosti i avtotransporta na rastitel'nyy pokrov* [Influence of emissions from industry and vehicles on the vegetation cover]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern science-intensive technologies], 2005, no. 10, pp. 97–98.
- [10] Papina O.N., Sobchak R.O., Astafurova T.P. *Vliyanie urbanizirovannoy sredy na pokrovnnye tkani i sodержanie vody v khvoe vidov semeystva Pinaceae Lindl* [Influence of the urbanized environment on integumentary tissues and water content in the needles of species of the family Pinaceae Lindl]. *Vestnik Tomskogo GTU. Biologiya* [Bulletin of the Tomsk State Technical University. Biology], 2013, no. 3 (23), pp. 152–161.
- [11] Zotikova A.P., Bender O.G., Sobchak R.O., Astafurova T.P. *Sravnitel'naya otsenka strukturno-funktional'noy organizatsii listovogo apparata khvoynnykh rasteniy na territorii g. Gorno-Altayska* [Comparative assessment of the structural and functional organization of the leaf apparatus of coniferous plants on the territory of the city of Gorno-Altai]. *Vestnik Tomskogo GTU* [Bulletin of the Tomsk State Technical University], 2007, no. 299, pp. 152–161.
- [12] Neverova O.A. *Primenenie fitoindikatsii v otsenke zagryazneniya okruzhayushchey sredy* [The use of phytointication in assessing environmental pollution]. *Biosfera* [Biosfera], 2009, no. 1, pp. 82–92.
- [13] Kuznetsova V.V., Chernokul'skiy A.V., Kozlov F.A., Kukhta A.E. *Svyaz' lineynogo i radial'nogo prirosta sosny obyknovennoy s osadkami raznogo genezisa v lesakh Kerzhenskogo zapovednika* [Relationship between linear and radial growth of Scotch pine with sediments of different genesis in the forests of the Kerzhensky Reserve]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya* [Izvestiya RAN. Geographic Series], 2020, no. 1, pp. 93–102. DOI: 10.31857/S2587556620010124
- [14] Kukhta A.E., Popova E.N. *Klimaticheskii signal v lineynom priroste sosny obyknovennoy boreal'nykh fitotsenozov poberezh'ya Belogo morya* [Climate signal in the linear growth of Scotch pine in boreal phytocenoses of the White Sea coast]. *Ekologicheskiy monitoring i modelirovanie ekosistem* [Ecological monitoring and modeling of ecosystems], 2020, v. 31, no. 3–4, pp. 33–45. DOI: 10.21513/0207-2564-2020-3-33-45
- [15] Maksimova O.V., Kukhta A.E. *Variabel'nost' lineynykh i radial'nykh prirostov sosny obyknovennoy poberezh'ya Belogo morya v zavisimosti ot usloviy proizrastaniya* [Variability of linear and radial increments of Scots pine of the White Sea coast depending on growing conditions]. *Ekologicheskiy monitoring i modelirovanie ekosistem* [Ecological monitoring and modeling of ecosystems], 2022, v. 34, no. 1–2, pp. 20–36. DOI: 10.21513/0207-2564-2022-3-4-20-36
- [16] Bradley R.S. *Paleoclimatology. Reconstructing climates of the Quaternary*. UK: Elsevier, 2015. 667 p.
- [17] Tishkov A.A., Krenke-m. A.N. «*Pozeleneniye*» Arktiki v KhKhI veke kak effekt sinergizma deystviya global'nogo potepleniya i khozyaystvennogo osvoeniya [«Greening» the Arctic in the 21st century as a synergy effect of global warming and economic development]. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economics], 2015, no. 4, pp. 28–38.
- [18] Chernogaeva G.M., Kuhta A.E. *The Response of Boreal Forest Stands to Recent Climate Change in the North of the European Part of Russia*. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2018, 43(6), pp. 418–424. DOI: 10.3103/S1068373918060109
- [19] Maksimova O.V., Kukhta A.E., Suslova S.B. *O stabilizatsii izmenchivosti prirostov sosny obyknovennoy v raznykh geograficheskikh usloviyakh Evropeyskoy territorii Rossii* [On Stabilization of Scotch Pine Increment Variability in Different Geographical Conditions of the European Territory of Russia]. *Problemy regional'noy ekologii* [Problems of Regional Ecology], 2023, no. 1, pp. 17–27.
- [20] Maksimova O.V., Kukhta A.E. *Otsenka izmeneniya lineynykh prirostov sosny obyknovennoy Pechoro-Ilychskogo zapovednika na osnove klimaticheskogo prognoza temperatury prizemnogo vozdukh v rossiyskoy Arktike* [Estimation of changes in linear increments of Scots pine in the Pechoro-Ilychsky Reserve based on the climatic forecast of surface air temperature in the Russian Arctic]. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arktika: ekologiya i ekonomika], 2022, v. 12, no. 1, pp. 77–86. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-1-77-86
- [21] Koukhta A.E., Maksimova O.V. *Effects of growing season climatic factors on Scots pine increment for the middle Volga region and the white sea coast* // *Russian Meteorology and Hydrology*, 2022, v. 47, no. 1, pp. 50–58.
- [22] Alisov B.P. *Klimat SSSR* [Climate of the USSR]. Moscow: Publishing House of Moscow University, 1956, 128 p.
- [23] Berg L.S. *Klimat i zhizn'* [Climate and life]. Moscow: Gosizdat, 1922, 157 p.
- [24] Sukachev V.N. *Izbrannye trudy v trekh tomakh. T. 1: Osnovy lesnoy tipologii i biogeotsenologii* [Selected works in three volumes, v. 1: Fundamentals of forest typology and biogeocenology]. Ed. E.M. Lavrenko. Leningrad: Nauka, 1972, 419 p.
- [25] *Natsional'nyy doklad o kadastre antropogennykh vybrosov iz istochnikov i absorbtzii poglotitelyami parnikovyykh gazov, ne reguliruemyykh Monreal'skim protokolom za 1990–2020 gg.* [National report on the inventory of anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases not controlled by the Montreal Protocol for 1990–2020]. Moscow: IGKE, 2022, pp. 58–61.
- [26] Hoesly R., Smith S., Feng L., Klimont Z., Janssens-Maenhout G., Pitkanen T., Seibert J.J., et al. *Historical Emissions (1750–2014) – CEDS – v2017-05-18*. System Grid Federation, 2017. DOI: 10.22033/ESGF/INPUT4MIPS.1241
- [27] Ginzburg V.A., Zelenova M.S., Korotkov V.N., Kudryavtseva L.V., Lytov V.M., Maksimova O.V., Popov N.V. *Raschetnye otsenki vybrosov chernogo ugleroda ot prioritnykh kategoriy istochnikov v Rossii* [Estimated estimates of black carbon emissions from priority source categories in Russia]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and Hydrology], 2022, no. 10, pp. 78–91. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-10-78-91
- [28] Van M., Margreet J.E., Kloster S., Magi B.I., Marlon J.R., Daniau A.-L., Field R.D., et al. *Biomass Burning emissions for CMIP6 (vol. 1.2)*. Earth System Grid Federation, 2016. DOI: 10.22033/ESGF/input4MIPs.1117
- [29] Ayvazyan S.A., Mkhitarian V.S. *Prikladnaya statistika. Osnovy ekonometriki. T. 1: Teoriya veroyatnostey i prikladnaya statistika* [Applied statistics. Fundamentals of econometrics. v. 1: Probability Theory and Applied Statistics]. Moscow: UNITI-DANA, 2001, 656 p.
- [30] Sidorenko E.V. *Metody matematicheskoy obrabotki v psikhologii* [Methods of mathematical processing in psychology]. St. Petersburg: Rech, 2000, 349 p.

- [31] *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh № 2022622573 Rossiyskaya Federatsiya. Vybrosoy chernogo ugleroda po regionam Arkticheskoy zony RF v 2013 g.: № 2022622353: zayavl. 29.09.2022: opubl. 19.10.2022 / O.V. Maksimova, M.S. Zelenova, L.V. Kudryavtseva, V.M. Lytov; zayavitel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie «Institut global'nogo klimata i ekologii imeni akademika Yu.A. Izraelya»* [Certificate of state registration of the database no. 2022622573 Russian Federation. Emissions of black carbon by regions of the Arctic zone of the Russian Federation in 2013: No. 2022622353: Appl. 09/29/2022: publ. October 19, 2022. O.V. Maksimova, M.S. Zelenova, L.V. Kudryavtseva, V.M. Lytov; applicant Federal State Budgetary Institution «Institute of Global Climate and Ecology named after Academician Yu.A. Israel»].
- [32] Kukhta A.E., Pchelkin A.V., Poleshchuk A.M. *Otsenka otklika drevostoev sosny i eli Tsentral'no-Lesnogo gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika na transgranichnoe zagryaznenie vozdukhа metodami Mezhdunarodnoy sovmestnoy programmy kompleksnogo monitoringa* [Evaluation of the response of pine and spruce stands of the central forest state natural reserve to transboundary air pollution using the methods of the international joint program of integrated monitoring]. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem* [Problems of ecological monitoring and modeling of ecosystems], 2018, v. 29, no. 4, pp. 29–37. DOI: 10.21513/0207-2564-2018-4-29-43
- [33] Dolgova E.A., Matskovskiy V.V., Solomina O.N. *Dendrokronologiya Solovetskikh ostrovov* [Dendrochronology of the Solovetsky Islands]. *Geografiya: razvitie nauki i obrazovaniya* [Geography: development of science and education], 2018, v. 1, pp. 394–398.
- [34] Dolgova E., Cherenkova E., Solomina O., Matskovsky V. Influence of the large-scale atmospheric circulation variations on spruce tree-ring growth from Solovki Islands (Russia). *Practical Geography and XXI Century Challenges*, 2018, pp. 78–78.

*The study was carried out within the framework of the scientific theme of Roshydromet (FGBU «IGCE») AAA-A20-120021090098-8 «Development of methods and technologies for computational monitoring of anthropogenic emissions and absorption by sinks of greenhouse gases and short-lived climatically active substances»; NIOCTR AAA-A20-120013190049-4 «Development of methods and technologies for monitoring of environmental pollution due to transboundary pollutantion (UNECE: EMEP, SME CM) and acid deposition in East Asia (EANET)».*

## Authors' information

**Maksimova Olga Vladimirovna** — Cand. Sci. (Technical Sciences), Leading Researcher, Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology; Associate Professor of the Department of Mathematics, University of Science and Technology MISIS, o-maximova@yandex.ru

**Koukhta Anna Evgen'evna**✉ — Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, anna\_koukhta@mail.ru

**Korotkov Sergey Aleksandrovich** — Cand. Sci. (Biology), Associate Professor of BMSTU (Mytishchi branch); Institute of Forest Science RAS, skorotkov@mgul.ac.ru

Received 13.01.2023.

Approved after review 16.06.2023.

Accepted for publication 07.09.2023.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article  
The authors declare that there is no conflict of interest