

## ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ПРИРОСТОВ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ ПЕЧОРО-ИЛЫЧСКОГО ЗАПОВЕДНИКА НА ОСНОВЕ КЛИМАТИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИЗЕМНОГО ВОЗДУХА В РОССИЙСКОЙ АРКТИКЕ

**О. В. Максимова**

Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля,  
Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
(Москва, Российская Федерация)

**А. Е. Кухта**

Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 5 июля 2021 г.

*Для арктического региона европейской территории России проведена верификация глобальных климатических моделей проекта CMIP6 с данными реанализа ERA5. Выявлена наиболее точная модель, на основе которой сделан прогноз приземной температуры для июля-сентября в условиях двух сценариев: высоких выбросов SSP8.5 и низких SSP2.6. Полученные результаты дают представление о среднем потеплении в ближайшие 29 лет для этих месяцев. Исследован отклик приростов сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L. Печоро-Ильчского заповедника на прогнозируемое потепление. Кроме того, выявлено значимое воздействие сумм осадков на параметры роста древостоев. Построена регрессионная модель, отражающая суммарный вклад указанных климатических факторов в формирование приростов сосны.*

**Ключевые слова:** глобальные климатические модели, CMIP6, температура приземного воздуха, сумма осадков, сосна обыкновенная, линейный прирост, биотопы.

### Введение

В последние десятилетия пристальное внимание климатологов и экологов приковано к Арктике, так как по многолетним наблюдениям скорость климатических изменений в регионе значительно выше, чем в среднем на глобальном уровне [1]. По данным наблюдательной сети Росгидромета, результаты анализа которых представлены в [2], наибольшая скорость роста среднегодовой температуры в последние годы отмечается в Арктической зоне России. В связи с опережающим глобальный уровень потеплением российской Арктики, которому сопутствует целый ряд экологических, медицинских и экономических проблем [3—5], возрастает актуальность развития методологии прогностической оценки изменений параметров арктических климатических областей европейской территории России (ЕТР).

В Третьем отчете МГЭИК [6] утверждалось, что моделирование климата корректно лишь для достаточно крупных пространственных масштабов (вплоть до «субконтинентального»). К настоящему времени

глобальные климатические модели характеризуются в среднем более высоким пространственным разрешением и рядом усовершенствований в описании климата. Это позволяет проводить оценку воспроизводимости региональных характеристик климатических параметров глобальными климатическими моделями и давать их прогнозные оценки для регионов [1; 7; 8].

Изменение климата, тем более в Арктике, где экосистемы характеризуются повышенной уязвимостью, не может не сказаться на характере развития растительности, рост и продуктивность которой напрямую зависят от метеорологических условий [9—11]. Показателями многолетних взаимодействий климатической системы и лесных биогеоценозов являются ряды индексированных приростов деревьев. Указанные хронологии показывают интегрированные отклики древостоев на воздействия температур, осадков и т. д. по параметрам приростов.

Оценке воздействия температур и осадков на характер роста древостоев, а также прогнозам изменений как кольцевых, так и радиальных приростов

деревьев в зависимости от ожидаемых сдвигов состояния климатической системы (в том числе и в Арктике) посвящены многочисленные работы [11—16]. Однако представленные в данном исследовании прогностические оценки трендов линейных приростов сосны обыкновенной в соответствии с прогнозами изменений климата регионального масштаба выполняются впервые.

Цель работы — сделать региональный прогноз для арктической части ЕТР по температуре приземного воздуха на ближайшие три десятилетия в условиях позитивного и негативного сценариев [17], а также на материале модельных популяций сосны обыкновенной опробовать количественную оценку воздействия рассматриваемых температур и осадков на линейные приросты указанной породы в различных биотопах.

### Методы и материалы

В северных широтах Европы в зимний период климатические модели могут давать расхождение в оценках по некоторым климатическим параметрам: например, по приземной температуре воздуха расхождения могут достигать 5—6°C [18; 19]. Это связано с сильным влиянием региональных особенностей циркуляции, характеристик режима осадков, ветра и подстилающей поверхности [7; 20]. Для прогноза будущих изменений климата и его чувствительности при различных внешних изменениях окружающей среды первоначально решалась задача верификации глобальных климатических моделей на историческом периоде и выбора моделей, наиболее точно воспроизводящих климат в арктическом регионе [21]. Для верификации рассматривались глобальные климатические модели, принявшие участие в 6-й фазе международного проекта по сравнению объединенных моделей CMIP6<sup>1</sup>. Сравнение проводилось с данными реанализа ERA5 по многолетней среднесезонной (июль-сентябрь) температуре приземного воздуха по главному члену ансамбля r1i1p1. Для сравнения был выбран период с 1986 по 2018 гг., так как для него имеются сопоставимые ряды данных реанализа, заповедника и модельных экспериментов. Использовались два сценария прогнозирования климата: высоких выбросов SSP8.5 и низких выбросов SSP2.6 [17]. Часть территории арктического региона в исследовании представлена соседствующими территориями Архангельской области, Ненецкого автономного округа (АО) и Республики Коми.

Для анализа отклика древостоев сосны на изменения климатических параметров были использованы результаты измерений линейных приростов (т. е. годовых приростов междуузлий) сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* L., 1753 (класс *Pinopsida*, порядок *Pinales*, семейство *Pinaceae*)<sup>2</sup>.

Измерения линейных приростов проводились в 2002 г. на материале подроста, молодняка и припевающих деревьев по методике, представленной в [11; 13], в Печоро-Ильчском государственном природном биосферном заповеднике. Пробные площади, каждая радиусом 10 м, были заложены маршрутным методом в свежих (22 пробные площади), сухих (20 пробных площадей) и влажных (8 пробных площадей) местообитаниях (всего 50 пробных площадей). На каждой из них случайным образом выбиралось и измерялось по пять деревьев. У отобранных экземпляров определялись размеры междуузлия стволика/ствола начиная с верхнего и до последнего четко различимого над корневой шейкой. В результате был получен архив за 1982—2002 гг.

Ряды приростов индексировались, т. е. из них удалялась возрастная компонента. В результате этой стандартной процедуры получались динамические ряды индексов приростов, что делало возможным сравнивать отклики рядов приростов деревьев разного возраста на воздействие климатических факторов с учетом мозаичности местообитаний изучаемых древостоев [11—13].

Метеоданные, используемые в работе, получены на метеорологической станции Печоро-Ильчского заповедника и любезно предоставлены авторам его администрацией.

Для выявления связи линейных приростов с температурами и суммарными осадками выбирались периоды с мая по сентябрь предшествующего года и с апреля по июль текущего. Для осадков использовались суммарные значения предшествующего года, что обусловлено важностью прироста в текущем году размера и качества почки возобновления, заложенной в предыдущем вегетационном сезоне, а также количество хвои прошлых лет, осуществляющей донорские функции по отношению к рассматриваемому побегу [11; 13].

Так как от года к году данные по приросту междуузлий подвержены сильной вариабельности, для выявления корреляционных связей с осадками вместо среднего значения прироста за год выбрано его медианное значение ввиду устойчивости медианы к экстремальным значениям в выборке (выбросам). В таком случае медиана даст более полное представление о «типичном» значении прироста междуузлий, нежели простое среднее. Для оценки связи между медианами индексов линейных приростов междуузлий сосны и суммарными атмосферными осадками, а также температурами использовались коэффициенты корреляции Пирсона  $r$  с оценкой значимости по критерию Стьюдента на уровне  $\alpha = 0,1$ . Для реализации корреляционно-регрессионного анализа временных рядов и статистического оценивания [22] использовались программный модуль Statistica 15<sup>3</sup> и пакет Excel 2016.

Все рисунки в данной работе выполнены авторами.

<sup>1</sup> <https://esgf-index1.ceda.ac.uk/projects/cmip6-ceda/>.

<sup>2</sup> Плонтариум: растения и лишайники России и сопредельных стран: открытый онлайн атлас и определитель растений. — URL: <http://www.plantarium.ru>.

<sup>3</sup> <http://statsoft.ru/products/>.

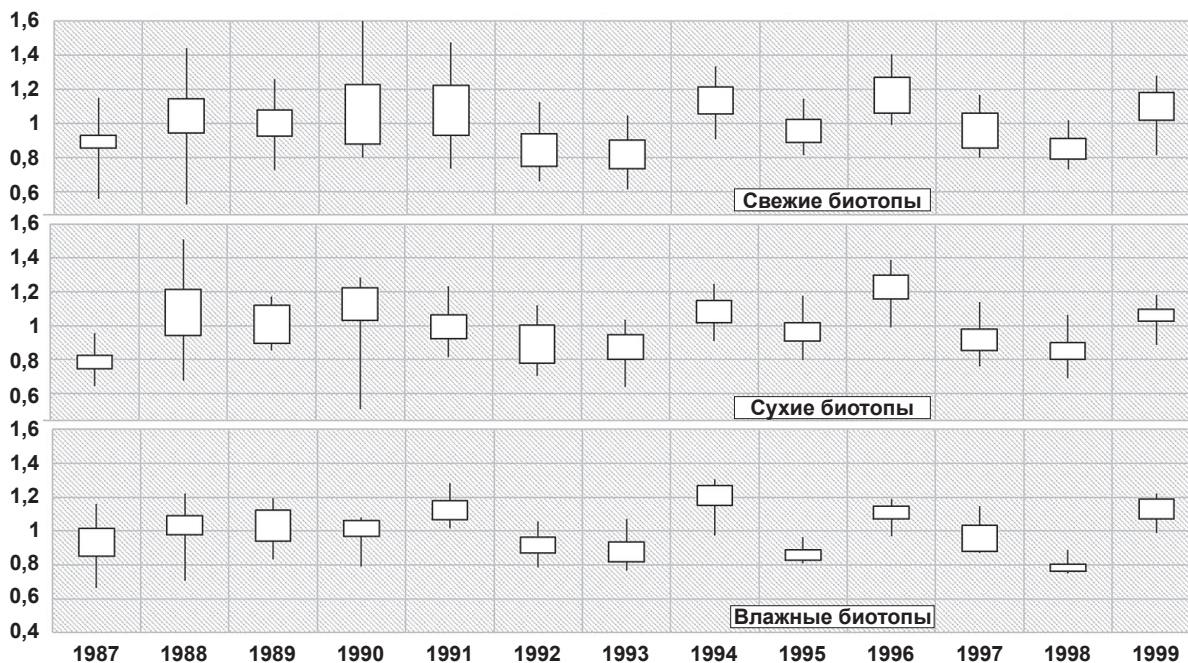


Рис. 1. Диаграммы *box-and-whiskers* для индексов приростов сосны в трех биотопах Печоро-Ильчского заповедника с 1987 по 1999 гг.

Fig. 1. *Box-and-whiskers* plots for pine growth indices in three biotopes of Pechora-Ilych Nature Reserve from 1987 to 1999

### Район исследований

Модельным объектом изучения послужили древостои сосны Печоро-Ильчского государственного природного биосферного заповедника (далее — Печоро-Ильчский заповедник).

Печоро-Ильчский заповедник расположен в северо-восточной подобласти Атлантико-арктической лесной области умеренного пояса [23]. Исследуемая часть заповедника относится к Средне-таежному району европейской части России<sup>4</sup>. Для заповедника характерна таежная растительность, при этом бореальные фитоассоциации здесь содержат значительное количество сибирских элементов.

Согласно Л. С. Бергу, средообразующим фактором бореальных экосистем является гумидный климат, а также ландшафт, формируемый микро- и мезорельефом [24]. Высокое разнообразие ландшафтов и мозаичность местообитаний обуславливают многообразие биотопов, характеризующихся различными условиями увлажнения и параметрами почв.

Типология биотопов в настоящей работе принята в соответствии с классической системой В. Н. Сукачева [9]. Влажные местообитания заповедника представляют собой сосняки сфагновые (*Pineta sylvestris fruticuloso-sphagnosa*). В свежих местообитаниях обычны сосновые древостои (*Pineta fruticuloso-hylocomiosa*) с примесью ели (*P. abies* (L.) H. Karst.)

и березы (*Betula pendula* Roth). В сухих местообитаниях, как правило, произрастают сосняки лишайниковые (*Pineta sylvestris cladinoso*)<sup>5</sup> (база данных «Ценофонд Европейской России»).

### Результаты и обсуждение

*Связь вариабельности линейных приростов сосны с типом биотопа*

Как показано в наших ранее проведенных исследованиях, параметры изменчивости приростов как показателя отклика древостоев на воздействия внешних факторов зависят от характеров местопроизрастаний [11; 13]. В данной работе индексы линейных приростов также представлены для трех типов биотопов: свежего, влажного и сухого [9]. Для оценки влияния типа биотопа на линейные приросты сосны взят период с 1987 по 1999 гг., так как именно для него имеются сопоставимые ряды данных приростов. Визуализацией вариабельности индексов приростов служит диаграмма *box-and-whiskers* [25] на рис. 1, отображающая различия показателей от года к году в каждом биотопе как в интерквартильном разбросе IQR, так и в размахе этих значений *R*. Отмечается меньшая межгодовая вариабельность во влажных биотопах по сравнению с сухими и свежими, а в сухих биотопах в некоторые годы явно выражена асимметрия. Статистическое сравнение IQR с помощью непараметрического *H*-критерия дало значимые отличия индексов приростов, причем они обусловлены первоначально различием вариабель-

<sup>4</sup> Приказ Федерального агентства лесного хозяйства «Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации» от 9 марта 2011 г. № 61. — URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/2074564/>.

<sup>5</sup> База данных «Ценофонд Европейской России». — URL: <http://cepl.rssi.ru/bio/flora/princip.htm>.

**Таблица 1. Коэффициенты корреляции между медианами индексов линейных приростов сосны и суммами осадков, а также температурами Печоро-Ильчского заповедника за 1987—1999 гг.**

Показатель	Свежий биотоп	Влажный биотоп	Сухой биотоп
Суммарные двухгодичные осадки *	0,46	0,33	0,28
Суммарные осадки текущего года **	0,50	0,41	0,41
Суммарные осадки предыдущего года ***	0,19	0,10	0,03
Средние температуры за май-июнь текущего года	-0,17	-0,04	-0,17
Средние температуры за июль-сентябрь предыдущего года	0,56	0,56	0,78

\* Суммарные двухгодичные осадки рассчитывались как совокупность атмосферных осадков за май-сентябрь предыдущего вегетационного сезона и за апрель-июль текущего года.

\*\* Осадки текущего года рассчитывались как совокупность атмосферных осадков за период апрель-июль.

\*\*\* Осадки предыдущего года рассчитывались как совокупность атмосферных осадков за период май-сентябрь.

ности во влажных биотопах по отношению к свежим (величина  $p_{\text{value}} = 0,009 < \alpha$ ). Во влажных биотопах вариабельность оказывается в среднем меньше (см. рис. 1). Причиной этого, очевидно, является большая по сравнению с другими местообитаниями стабильность условий в корнеобитаемом слое сфагновых болот и заболоченных лесов. Параметры среды во влажных биотопах хоть и не оптимальны, но отличаются меньшей изменчивостью в течение вегетационного сезона [11; 13].

Таким образом, дальнейший анализ влияния различных климатических параметров на линейные приросты сосны необходимо вести для каждого биотопа отдельно.

*Исследование связи осадков и температур с индексами линейных приростов сосны*

Коэффициенты корреляции, полученные для каждого типа биотопа, между медианами индексов приростов и величинами суммарных атмосферных осадков, а также между средними температурами вегетационных периодов выявляют (табл. 1) следующее:

- наибольшие значения наблюдаются с осадками текущего года <sup>6</sup> и средними температурами за июль-сентябрь предыдущего года;
- среди них имеются значимые связи с суммарными осадками текущего года для индексов приростов в свежих биотопах ( $r = 0,50$ ) и со средними температурами для индексов предыдущего вегетационного периода во всех типах биотопов ( $r = 0,56, 0,56, 0,78$  для свежих, влажных и сухих соответственно).

Полученные значения коэффициентов корреляции раскрывают наличие положительной зависимости рядов индексов приростов от сумм осадков в течение фенофазы роста междуузлий в свежих биотопах. Кроме того, во всех трех типах местообитаний

<sup>6</sup> Осадки текущего года рассчитывались как совокупность атмосферных осадков за апрель-июль.

размеры междуузлий напрямую обуславливаются суммами температур фенофазы формирования почек возобновления в предыдущем вегетационном сезоне.

Для дальнейшего прогнозирования возможных значений линейных приростов при изменении климатических параметров оценим суммарный вклад значимых факторов и построим регрессионную модель. В первую очередь рассмотрим такую модель для свежих биотопов:

$$\hat{y} = 0,158 + 0,001x_1 + 0,049x_2, \quad (1)$$

где  $x_1$  — суммарные осадки текущего года, мм;  $x_2$  — средние температуры за июль-сентябрь предыдущего года, °C;  $\hat{y}$  — регрессионное значение индекса линейного прироста.

Коэффициент детерминации  $R^2 \gg 0,53$ , отражающий меру качества регрессионной модели (1), показывает, что 53% вариации индексов приростов обусловлены построенной моделью и влиянием включенных факторов, оставшиеся 47% объясняются действием неучтенных факторов или ошибками наблюдений. Полученная модель (1) значима в целом, при этом коэффициенты при регрессорах модели значимы, а свободный член не значим (рис. 2).

Это свидетельствует об очень малом линейном приросте междуузлий сосны при отсутствии следующих благоприятных условий: суммарных осадков и средних температур предыдущего и текущего вегетационных сезонов соответственно. Полученная модель работоспособна только в условиях, соответствующих норме реакции вида, и не применима к параметрам среды, выходящим за границы экологической ниши объекта исследований. Поэтому она позволяет сделать прогноз по возможному изменению индексов линейных приростов сосны с произрастанием в свежих биотопах заповедника

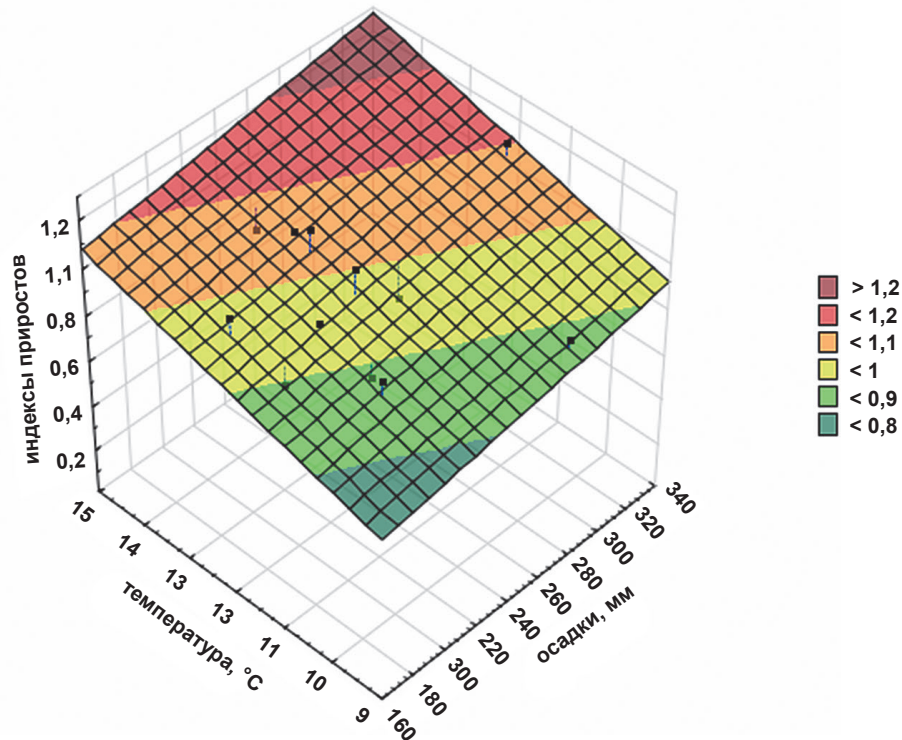


Рис. 2. Поверхность регрессионной модели зависимости индексов линейных приростов сосны от факторов: суммарных осадков текущего года (мм) и средних температур за июль-сентябрь предыдущего года (°C) для свежих биотопов  
Fig. 2. Surface of the regression model of the dependence of pine linear increment indices on the current year total precipitation (mm) and previous year average temperatures for July-September (°C) for fresh biotopes

в зависимости от региональных метеорологических условий. Полученные значимые модели для приростов в сухих и влажных биотопах в условиях обозначений (1) имеют вид  $\hat{y} = -0,248 + 0,001x_1 + 0,085x_2$  и  $\hat{y} = 0,075 + 0,001x_1 + 0,057x_2$  соответственно. У обеих моделей есть незначимый свободный член, это означает, что осадки и температуры служат основными факторами воздействия на приросты. Кроме того, для влажных биотопов в отличие от сухих незначимым оказывается и коэффициент при  $x_1$ , отражающий вклад суммарных осадков. Это может быть связано с доминирующей ролью осадков текущего (а не предыдущего) вегетационного сезона в формировании приростов.

Для оценки влияния осадков и температур на индексы линейных приростов рассчитаны бета-, дельта-коэффициенты и коэффициент эластичности, которые сведены в табл. 2 [26, с. 355—356]. Бета-коэффициенты показывают, на какую долю среднеквадратического отклонения (СКО) изменится индекс прироста, если фактор изменится на одно свое СКО, и позволяют упорядочить факторы по степени влияния на зависимую переменную. Дельта-коэффициенты показывают вклад фактора в суммарное влияние. Коэффициенты эластичности показывают, на сколько процентов в среднем изменится индекс линейного прироста, если фактор увеличится на 1%. Получаем, что для всех видов биотопов наиболее значимое влияние и наибольший вклад в индексы приростов имеет средняя температура

предшествующего вегетационного периода (см. табл. 2, бета- и дельта-коэффициенты). Наибольшая чувствительность к величине изменения индекса линейных приростов наблюдается также относительно средних температур, причем для влажных биотопов она максимальна по отношению к другим биотопам и дает среднее увеличение индекса на 1,03% при увеличении средней температуры на 1% при прочих равных условиях (см. табл. 2, коэффициенты эластичности). Но коэффициент эластичности не учитывает степень колеблемости факторов, поэтому комплексный анализ всех коэффициентов дает понимание, что наибольшую чувствительность к изменению средних температур предшествующего вегетационного сезона имеют приросты во влажных биотопах, а к осадкам — в свежих биотопах. Представляется вероятным, что выявленная зависимость приростов во влажных биотопах объясняется характерной для сфагновых местообитаний пониженной температурой субстрата и нехваткой тепла в течение фазы формирования почки возобновления в предыдущем вегетационном сезоне. В сухих биотопах нехватка влаги также является критичной на этапе развития почки возобновления, т. е. в предыдущем году. В то же время в свежих биотопах наблюдается дефицит влаги на этапе роста междоузлий, т. е. в текущем вегетационном сезоне. Выявленные закономерности подтверждают результаты, полученные нами ранее для древостоев Печоро-Ильчского заповедника [11].

Таблица 2. Оценка влияния суммарных осадков текущего года \* и средних температур за июль-сентябрь предыдущего года на индексы линейных приростов

Показатели	Свежий биотоп	Влажный биотоп	Сухой биотоп
Бета-коэффициенты:			
суммарные осадки текущего года	0,46	0,35	0,37
средние температуры за июль-сентябрь предыдущего года	0,53	0,76	0,53
Коэффициенты эластичности:			
суммарные осадки текущего года	0,24	0,22	0,23
средние температуры за июль-сентябрь предыдущего года	0,60	1,03	0,69
Дельта-коэффициенты:			
суммарные осадки текущего года	0,44	0,19	0,34
средние температуры за июль-сентябрь предыдущего года	0,56	0,81	0,66

\* Осадки текущего года рассчитывались как совокупность атмосферных осадков за апрель-июль.

*Климатический прогноз температуры приземного воздуха периода 2022—2050 гг. и анализ отклика индексов линейных приростов*

Чтобы оценить изменения индексов линейных приростов с 2022 по 2050 гг., построим прогноз по приземной температуре воздуха, которая достаточно хорошо поддается прогнозированию с использованием глобальных климатических моделей<sup>7</sup> [21]. Для выбора модели, наиболее точно воспроизводящей современный климат в арктическом регионе, проведена верификация глобальных климатических моделей проекта CMIP6 с данными реанализа ERA5 по температуре приземного воздуха с 1986 по 2014 гг. для вегетационного сезона июль-сентябрь [8]. Наиболее близкой в этих условиях к данным реанализа является модель CMCC-CM2-SR5, что дает возможность признать ее наиболее точной в оценке воспроизводимости климата по температуре приземного воздуха для Арктического региона (рис. 3а). Для прогнозирования на 2022—2050 гг. использована эта модель для двух сценариев — высоких выбросов SSP8.5 и низких SSP2.6 (рис. 3б). Эти сценарии обеспечивают максимально большой возможный диапазон вероятных изменений температуры приземного воздуха (рис. 3б), значения которой представлены в табл. 3.

Таким образом, в Арктической зоне европейской территории России, представленной соседствующими

областями (Архангельская область, Республика Коми и Ненецкий АО), в ближайшие 29 лет, согласно сценарным прогнозам SSP8.5 и SSP2.6, ожидается повышение среднесезонной температуры за июль-сентябрь в среднем на 2,7°C по сравнению с периодом 1986—2018 гг. Подобные изменения региональной климатической системы не могут не сказаться на параметрах роста древостоев сосны. В соответствии с представленной оценкой при сохранении среднего режима осадков ожидаемые индексы линейных приростов сосны в Печоро-Ильчском заповеднике составят в свежих биотопах 1,10—1,11, в сухих биотопах — 1,17—1,19, во влажных — 1,11—1,12 против наблюдаемых за период 1986—1999 гг. 0,99, 1,00 и 0,99 соответственно — см. модель (1). Данный прогноз оправдывается при сохранении неизменными всех остальных условий среды.

### Заключение

На материале древостоев Печоро-Ильчского заповедника зафиксирован отклик линейных приростов сосны обыкновенной на совместное действие температур и сумм осадков вегетационного периода. Согласно построенной регрессионной модели, наибольший вклад в параметры приростов дают суммы температур предыдущего года во всех типах местообитаний заповедника.

Для приземных температур арктического региона европейской территории России осуществлен региональный прогноз на 2022—2050 гг. При прогнозируемых температурах в пределах 1,8—2,0°C можно ожидать увеличения значений индексов линейных приростов. Параметры прироста сосны породы-эдикатора большинства бореальных биогеоценозов являются показателями состояния таежных экосистем. Полученный результат свидетельствует о вероятном росте продуктивности фитоассоциаций региона в рассматриваемый период при условии сохранения современных количеств осадков.

<sup>7</sup> Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021622215 Российская Федерация. Среднемесячные многолетние температуры приземного воздуха в период с 1979 по 2014 гг. для территории Архангельской области, Республики Коми, Ненецкого АО по данным исторического эксперимента 6-й фазы международного проекта сравнения объединенных моделей (CMIP6): № 2021622066: заявл. 13.10.2021: опубл. 21.10.2021 / О. В. Максимова; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт глобального климата и экологии имени академика Ю. А. Израэля».

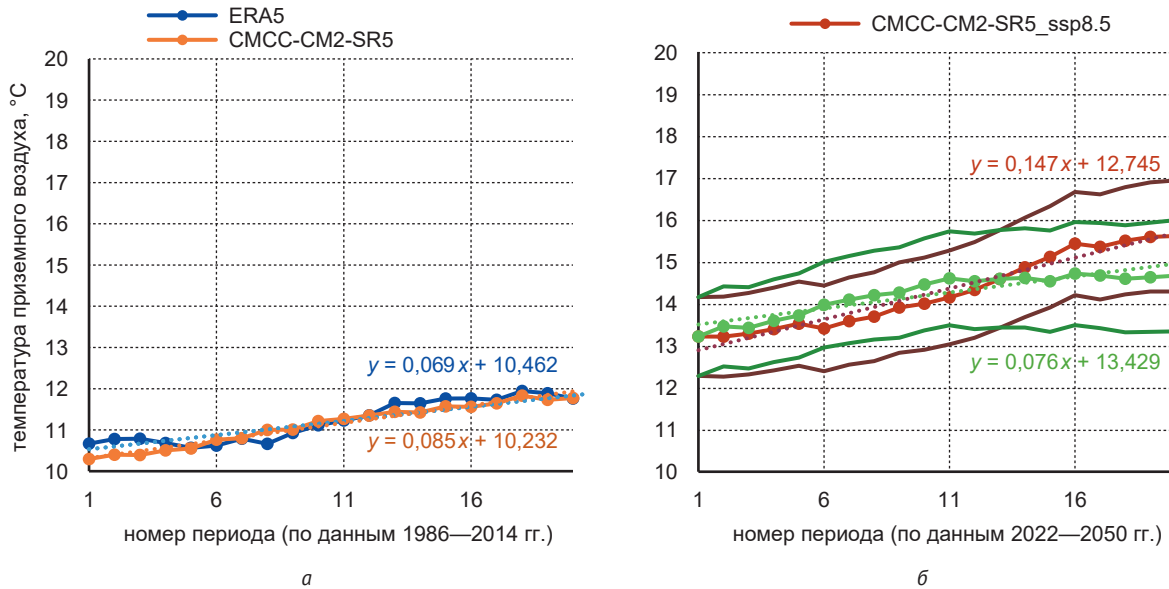


Рис. 3. Средние температуры приземного воздуха за июль-сентябрь с периодом сглаживания  $l = 10$  лет модели CMCC-CM2-SR5 по арктическому региону (Архангельская область, Ненецкий АО, Республика Коми) с указанием трендов: *a* – для исторического периода в сравнении с данными реанализа ERA5, *б* – для прогнозного периода в условиях сценариев SSP8.5 и SSP2.6 с 95%-ными доверительными интервалами  
 Pic. 3. Average surface air temperatures for July-September with a smoothing period  $l = 10$  years of the CMCC-CM2-SR5 model for the Arctic region (Arkhangelsk Region, Nenets Autonomous District, Rep. Коми) with trends: *a* – for the historical period in comparison with the ERA5 reanalysis data, *б* – for the forecast period under the conditions of the SSP8.5 and SSP2.6 scenarios with 95% confidence intervals

Таблица 3. Средняя температура приземного воздуха периода июль-сентябрь в арктическом регионе (Архангельская область, Ненецкий АО, Республика Коми) и 95%-ный доверительный интервал

ERA5 1986—2018 гг., °C	CMCC-CM2-SR5 (проект CMIP6) * 1986—2014 гг., °C	CMCC-CM2-SR5 SSP 8.5 2022—2050 гг., °C	CMCC-CM2-SR5 SSP 2.6 2022—2050 гг., °C
11,44	11,25 ± 0,37	14,29 ± 0,45	14,09 ± 0,47

\* <https://esgf-index1.ceda.ac.uk/projects/cmip6-ceda/>.

Работа выполнена в рамках темы 4.4. «Развитие методов и технологий мониторинга загрязнения природной среды вследствие трансграничного переноса загрязняющих веществ (ЕЭК ООН: ЕМЕП, МСП КМ) и кислотных выпадений в Восточной Азии (EANET)» плана НИТР Росгидромета (2020 г.), а также при поддержке со стороны гранта № 18-05-60183 «Процессы и последствия дальнего атмосферного переноса черного углерода и радионуклидов в Арктике».

### Литература

1. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменении климата и последствиях на территории Российской Федерации. — М.: Росгидромет, 2014.
2. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2015 год / Федер. служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. — М., 2016. — 204 с.
3. Пчелкин А. В. Базовые показатели лишеномониторинга на территории Государственного комплек-

ного природного заказника «Полярный круг» // Проблемы экол. мониторинга и моделирования экосистем. — 2021. — Т. 32, № 1-2. — С. 71—84. — DOI: 10.21513/0207-2564-2021-1-2-71-83.

4. Ревич Б. А. и др. Влияние глобальных климатических изменений на здоровье населения российской Арктики. — М.: Представительство ООН в РФ, 2008. — 28 с.

5. Тишков А. А., Белоновская Е. А., Кренке А. Н. и др. Изменения биологической продуктивности наземных экосистем российской Арктики в XXI в. // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 1. — С. 30—41. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-30-41.

6. Climate Change 2001: The Scientific Basis / J. T. Houghton et al., eds. — [S. l.]: Cambridge Univ. Press, 2001. — 881 p.

7. Бардин М. Ю. Сценарные прогнозы изменения температуры воздуха для регионов Российской Федерации до 2030 г. с использованием эмпирических

стохастических моделей климата // Метеорология и гидрология. — 2011. — № 4. — С. 5—20.

8. Максимова О. В., Гинзбург В. А. Изменения приземной температуры воздуха в континентальной части Арктического региона (Архангельская обл., Респ. Коми, Ненецкий АО) — анализ и выбор модели прогноза // Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Экосистемы и климат Арктической зоны: Расширенные тезисы докладов / Ин-т глоб. климата и экологии им. акад. Ю. А. Израэля; Ин-т географии РАН. — М., 2020. — С. 79—82.

9. 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.

10. Тишков А. А., Кренке-мл. А. Н. «Позеленение» Арктики в XXI в. как эффект синергизма действия глобального потепления и хозяйственного освоения // Арктика: экология и экономика. — 2015. — № 4. — С. 28—38.

11. Черногаева Г. М., Кухта А. Е. Отклик бореальных древостоев на современные изменения климата на севере европейской части России // Метеорология и гидрология. — 2018. — № 6. — С. 111—120.

12. 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 // Изв. РАН. Сер. Геогр. — 2020. — № 1. — С. 93—102. — DOI: 10.31857/S2587556620010124.

13. Кухта А. Е., Попова Е. Н. Климатический сигнал в линейном приросте сосны обыкновенной бореальных фитоценозов побережья Белого моря // Проблемы экол. мониторинга и моделирования экосистем. — 2020. — Т. 31, № 3-4. — С. 33—45. — DOI: 10.21513/0207-2564-2020-3-33-45.

14. Deck C., Wiles G., Frederick S. et al. Climate Response of Larch and Birch Forests across an Elevational Transect and Hemisphere-Wide Comparisons, Kamchatka Peninsula, Russian Far East // Forests. — 2017. — 8, 315. — DOI: 10.3390/f8090315.

15. Долгова Е. А., Соломина О. Н., Мацковский В. В. и др. Пространственная изменчивость прироста сосны на Соловецких островах // Изв. Рос. акад. наук.

Сер. Геогр. — 2019. — 2. — С. 41—50. — DOI: 10.31857/S2587-55662019241-50.

16. Matskovsky V., Kuznetsova V., Morozova P. et al. Estimated influence of extreme climate events in the 21st century on the radial growth of pine trees in Povolzhie region (European Russia) // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2020. — 611. — 012047. — DOI: 10.1088/1755-1315/611/1/012047.

17. O'Neill B. C., Tebaldi C., van Vuuren D. P. et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6 // Geosci. Model Dev. — 2016. — 9. — P. 3461—3482. — DOI: 10.5194/gmd-9-3461-2016.

18. Дымников В. П., Лыкоsov В. Н., Володин Е. М. и др. Моделирование климата и его изменений // Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования. — Т. 2. — М.: Наука, 2005.

19. Израэль Ю. А., Павлов А. В., Анохин Ю. А. и др. Статистические оценки изменения элементов климата в районах вечной мерзлоты на территории Российской Федерации // Метеорология и гидрология. — 2006. — № 5. — С. 27—38.

20. Semenov V., Matveeva T. Arctic Sea Ice in the First Half of the 20th Century: Temperature-Based Spatiotemporal Reconstruction // Izv. Atmospheric and Oceanic Physics. — 2020. — 56 (5). — P. 534—538. — DOI: 10.1134/S0001433820050102.

21. Катцов В. М., Мелешко В. П. Сравнительный анализ моделей общей циркуляции атмосферы и океана, предназначенных для оценки будущих изменений климата // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. — 2004. — Т. 40, № 6.

22. Закс Л. Статистическое оценивание. — М.: Статистика, 1986. — 360 с.

23. Алисов Б. П. Климат СССР. — М.: Изд-во. Моск. ун-та, 1956. — 128 с.

24. Берг Л. С. Климат и жизнь. — М.: Госиздат, 1922. — 157 с.

25. Тьюки Дж. Анализ результатов наблюдений: Разведочный анализ. — М.: Мир, 1981. — 696 с.

26. Елисеева И. И., Юзбашев М. М. Общая теория статистики. — М.: Финансы и статистика, 2004. — 655 с.

### Информация об авторах

Максимова Ольга Владимировна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт глобального климата и экологии им. академика Ю. А. Израэля (107258, Россия, Москва, Глебовская ул., д. 206), доцент кафедры математики, НИТУ «МИСиС» (119049, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 4), e-mail: o-maximova@yandex.ru.

Кухта Анна Евгеньевна, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Институт глобального климата и экологии им. академика Ю. А. Израэля (107258, Россия, Москва, Глебовская ул., д. 206), e-mail: anna\_koukhtha@mail.ru.

### Библиографическое описание данной статьи

Максимова О. В., Кухта А. Е. Оценка изменения линейных приростов сосны 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.



## ASSESSMENT OF CHANGES IN THE SCOTS PINE LINEAR INCREMENTS IN THE PECHORA-ILYCHSKY RESERVE BASED ON THE CLIMATIC FORECAST OF THE SURFACE AIR TEMPERATURE IN THE RUSSIAN ARCTIC

Maksimova, O. V.

Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, National University of Science and Technology "MISIS" (Moscow, Russian Federation)

Koukhata, A. E.

Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology (Moscow, Russian Federation)

The article was received on July 5, 2021

### Abstract

For the Arctic region of the European territory of Russia, the authors validated the global climate models of the CMIP6 project with the ERA5 reanalysis data. They identified the most accurate model, based on which made the forecast of surface temperature for the months of July–September under the conditions of two scenarios: high SSP8.5 emissions and low SSP2.6. The results give an idea of the average warming in the next 29 years for these months by 1.8–2.0 (°C). The researchers investigated the response of the increments of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Pechora-Ilychsky Reserve to the predicted warming. In addition, they revealed a significant effect of precipitation amounts on the growth parameters of forest stands. The built regression model reflects the total contribution of these climatic factors to the formation of pine increments.

**Keywords:** *global climatic models, CMIP6, surface air temperature, precipitation amount, Scots pine, linear increment, biotops.*

The work was carried out according to the State Assignment on the theme 4.4 “Development of methods and technologies for monitoring environmental pollution due to transboundary transport of pollutants (UNECE: EMEP, ICP KM) and acid deposition in East Asia (EANET)” of the Roshydromet R&D Plan (2020), as well as with the support of grant No. 18-05-60183 “Processes and consequences of long-range atmospheric transport of black carbon and radionuclides in the Arctic”.

### References

1. The second assessment report of Roshydromet on climate change and consequences in the territory of the Russian Federation. Moscow, Roshydromet, 2014. (In Russian).
2. Review of the state and pollution of the environment in the Russian Federation in 2015. Federal Service of Russia for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, 2016, 204 p. (In Russian).
3. Pchyolkin A. V. Basic indicators of lichemonitoring in the territory of the “Polar circle” complex natural reserve. *Problemy ekol. monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 2021, vol. 32, no. 1-2, pp. 71–84. DOI: 10.21513/0207-2564-2021-1-2-71-83. (In Russian).
4. Revich B. A. et al. The impact of global climate change on the health of the population of the Russian Arctic. Moscow, UN Office in the Russian Federation, 28 p. (In Russian).
5. Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Krenke A. N., Titova S. V., Tsarevskaya N. G. Changes in the biological productivity of terrestrial ecosystems in the Russian Arctic in the XXI century. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 1, pp. 30–41. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-30-41. (In Russian).
6. Climate Change 2001: The Scientific Basis. J. T. Houghton et al., eds. [S. I.], Cambridge Univ. Press, 2001, 881 p.
7. Bardin M. Yu. Scenario forecasts of air temperature changes for the regions of the Russian Federation until 2030 using empirical stochastic climate models. *Meteorologiya i gidrologiya*, 2011, no. 4, pp. 5–20. (In Russian).
8. Maksimova O. V., Ginsbourg V. A. Changes in surface air temperature in the continental part of the Arctic region (Arkhangelsk region, Rep. Komi, Nenets Autonomous Okrug) — analysis and selection of a forecast model. *Monitoring of the state and pollution of the environment. Ecosystems and climate of the Arctic zone. Extended abstracts. In-t glob. klimata i ekologii im. akad. Yu. A. Izraelya; In-t geografii RAN*, 2020, pp. 79–82. (In Russian).
9. Soukachev V. N. Selected Works in Three Volumes Vol. 1. Fundamentals of Forest Typology and Biogeocenology. Under the editorship of E. M. Lavrenko. Leningrad, Nauka, 1972, 419 p. (In Russian).
10. Tishkov A. A., Krenke Jr A. E. “Greening” of the Arctic in the XXI century as a synergistic effect of global warming and economic development. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2015, no. 4, pp. 28–38. (In Russian).
11. 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. *Russian Meteorology*, 2011, no. 4, pp. 5–20. (In Russian).

rology and Hydrology, 2018, vol. 43, no. 6, pp. 418—424. DOI: 10.3103/S1068373918080101.

12. Kuznecova V. V., Chernokulsky A. V., Kozlov F. A., Koukhtha A. E. The Connection Between Scots Pine Linear and Radial Increment with Different Genesis' Precipitation in Forests of the Kerzhenskiy Reserve. *Izv. Ros. akad. nauk. Ser. Geogr.*, 2020, no. 1, pp. 93—102. DOI: 10.31857/S2587556620010124. (In Russian).

13. Koukhtha A. E., Popova E. N. Climatic signal in Scots pine linear increment in boreal phytocenosis of White sea coast. *Problemy ekol. monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 2020, vol. 31, no. 3-4, pp. 33—45. DOI: 10.21513/0207-2564-2020-3-33-45. (In Russian).

14. Deck C., Wiles G., Frederick S., Matsovsky V., Kuderina T., D'Arrigo R., Solomina O., Wiesenberger N. Climate Response of Larch and Birch Forests across an Elevational Transect and Hemisphere-Wide Comparisons, Kamchatka Peninsula, Russian Far East. *Forests*, 2017, 8, 315. DOI: 10.3390/f8090315.

15. Dolgova E. A., Solomina O. N., Matkovsky V. V., Dobryansky A. S., Semenyak N. A., Shpunt S. S. Spatial Variation of Pine Tree-Ring Growth in the Solovetsky Islands. *Izv. Ros. Akad. Nauk. Ser. Geogr.*, 2019, no. 2, pp. 41—50. DOI: 10.31857/S2587-55662019241-50. (In Russian).

16. Matkovsky V., Kuznetsova V., Morozova P., Semenyak N., Solomina O. Estimated influence of extreme climate events in the 21st century on the radial growth of pine trees in Povolzhie region (European Russia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 611, 012047. DOI: 10.1088/1755-1315/611/1/012047.

17. O'Neill B. C., Tebaldi C., van Vuuren D. P., Eyring V., Friedlingstein P., Hurtt G., Knutti R., Kriegler E., Lamarque J.-F., Lowe J., Meehl G. A., Moss R., Riahi K., Sanderson B. M. The Scenario Model Intercom-

parison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, 9, 2016. pp. 3461—3482. DOI: 10.5194/gmd-9-3461-2016.

18. Dymnikov V. P., Lykosov V. N., Volodin E. M., Galin V. Ya., Glazunov A. V., Gritsun A. S., Diansky N. A., Tolstykh M. A., Chavro A. I. *Modeling Climate and Its Changes. Modern problems of computational mathematics and mathematical modeling. Vol. 2.* Moscow, Nauka, 2005. (In Russian).

19. Izrael Yu. A., Pavlov A. V., Anohin Ya. A., Myach L. T., Sherstyukov A. B. Statistical assessments of changes in climate elements in permafrost regions on the territory of the Russian Federation. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2006, no. 5, pp. 19—28.

20. Semenov V., Matveeva T. Arctic Sea Ice in the First Half of the 20th Century: Temperature-Based Spatiotemporal Reconstruction. *Izv. Atmospheric and Oceanic Physics*, 2020, 56 (5), pp. 534—538. DOI: 10.1134/S0001433820050102.

21. Katztov V. M., Meleshko V. P. Comparative analysis of atmospheric and ocean general circulation models designed to assess future climate changes. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2004, vol. 40, pp. 723—736. (In Russian).

22. Zax L. *Statistical estimation.* Moscow, Statistika, 1986, 360 p. (In Russian).

23. Alisov B. P. *Climate of the USSR.* Moscow, Izd-vo. Mosk. un-ta, 1956, 128 p. (In Russian).

24. Berg L. S. *Climate and life.* Moscow, Gosizdat, 1922, 157 p. (In Russian).

25. Tukey J. *Analysis of observation results. Exploratory analysis.* Moscow, Mir, 1981, 696 p. (In Russian).

26. Eliseeva I. I., Yuzbashev M. M. *General theory of statistics.* Moscow, Finance and statistics, 2004, 655 p. (In Russian).

### Information about the authors

**Maksimova, Olga Vladimirovna**, PhD of Engineering Sciences, Leading Researcher, Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology (20B, Glebovskaya str., Moscow, Russia, 107058), Associate Professor of the Department of Mathematics, National University of Science and Technology "MISIS" (4, Leninsky prosp., Moscow, Russia, 119049), e-mail: o-maximova@yandex.ru.

**Koukhtha, Anna Yevgen'yevna**, PhD of Biological Sciences, Leading Researcher, Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology (20B, Glebovskaya str., Moscow, Russia, 107058), e-mail: anna\_koukhtha@mail.ru.

### Bibliographic description of the article

**Maksimova, O. V., Koukhtha, A. E.** Assessment of changes in the Scots pine linear increments in the Pechora-Ilychsky Reserve based on the climatic forecast of the surface air temperature in the Russian Arctic Arktika: *ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2022, vol. 12, no. 1, pp. 77—86. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-1-77-86. (In Russian).

© Maksimova O. V., Koukhtha A. E., 2022