

**Зависимость продуктивности лесов от температуры и осадков  
для северо-запада России:  
прогноз с использованием модели Miami**

*М.Д. Корзухин, А.П. Андреева\**

Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,  
Россия, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б

\*Адрес для переписки: [andalexandrap@yandex.ru](mailto:andalexandrap@yandex.ru)

**Реферат.** Решалась задача нахождения фактора, лимитирующего продуктивность растительности для текущего и прогнозного климата для лесов Северо-Запада Европейской территории России (ЕТР). В пределах региона были выбраны три субъекта РФ, представительные для трех подзон бореальной тайги (северной, средней и южной): Мурманская, Архангельская и Костромская области. В качестве конкурирующих факторов были выбраны среднегодовая температура  $T$  и годовые осадки  $P$ . Расчет проводился по эмпирической модели Miami. Климатический сценарий RCP4.5 для 1990-2100 гг. соответствовал «умеренному» росту температуры и осадков. Основной результат говорит, что во всех случаях до 2100 года сохраняется лимитирование продуктивности температурой.

**Ключевые слова.** Нетто-продуктивность, эмпирическая модель МИАМИ, климатический сценарий RCP4.5, лимитирование продуктивности температурой.

**Dependence of forest productivity on temperature and precipitation for  
the north-west of Russia:  
a forecast using the Miami model**

*M.D. Korzukhin, A.P. Andreeva\**

Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology, 20B,  
Glebovskaya st., 107258, Moscow, Russian Federation

\*Correspondence address: [andalexandrap@yandex.ru](mailto:andalexandrap@yandex.ru)

**Abstract.** The problem of finding a factor limiting the productivity of vegetation for the current and forecast climate for the forests of the North-West of European Russia was solved. Within the region, three subjects were selected that are representative of the three subzones of the boreal taiga (northern, middle, and southern): Murmansk, Arkhangelsk and Kostroma regions. The mean annual temperature  $T$  and annual precipitation  $P$  were chosen as competing factors. The calculation was carried out according to the Miami empirical model. Climate scenario RCP4.5 for 1990-2100 corresponded to a "moderate" increase in

temperature and precipitation. The main result says that in all cases, until 2100, productivity is limited by temperature.

**Keywords.** Netto-productivity of vegetation, Miami empirical model, climate scenario RCP4.5, productivity limitation by temperature.

## Введение

Вопрос о природно-климатических факторах, лимитирующих продуктивность растительности, представляет прямой прикладной интерес: если мы имеем основания считать, что некий фактор не лимитирует NPP, то его можно не включать в описание ситуации. Под «продуктивностью» будем иметь в виду NPP (Net Primary Production,  $\text{г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ) лесной растительности.

Результаты расчетов по большим моделям, используемых, например, в CMIP6 (IPCC, 2021), содержат (в неявной форме) ответ на наш основной вопрос. Однако большинству экологов эти модели вряд ли доступны, поэтому естественно применить упрощенные инструменты, специфические для задачи (подход, методически близкий к использованному в Sallaba et al., 2015). В этом отношении удобна модель Miami (Lieth, 1975, результат анализа 52 баз данных по NPP), традиционно применяющаяся и как отдельный инструмент анализа (Lieth, 1975; Alexandrov et al., 2002a), так и в составе ансамбля моделей (Alexandrov et al., 2002b; Adams et al., 2004; Zaks et al., 2007; Grosso et al., 2008; Beer et al., 2010; Sallaba et al., 2015). Существенно, что применение модели Miami для прогнозируемого климата предполагает, что заложенные в нее зависимости сохранятся в будущем.

Основное утверждение состоит в том, что подавляющая часть лесов Северной Евразии находится в области, где продуктивность растительности лимитируется температурой и радиацией (PHAR), но не количеством воды. Этот вывод делается разными авторами и на разных основаниях. Nemani et al. (2003), Running et al. (2004) провели глобальный анализ роли  $T$ ,  $P$ , PHAR, и приведенные карты для Северной Евразии показывают лимитирование продуктивности температурой.

Ряду авторов ограничение роста температурой для региона Фенноскандии представляется самоочевидным и уже ранее подтвержденным (Saxe et al., 2001; Bergh et al., 2003). Подтверждение прямыми полевыми измерениями в Фенноскандии приведено в (Salminen, Jalkanen, 2005; Briceño-Elizondo et al., 2006), а модельными расчетами – в (Torssonon et al., 2015).

Модельный «принцип лимитирования» повсеместно используется в экологических расчетах (чемпионом, видимо, является экофизиологическая модель фотосинтеза (Farquhar et al., 1980), задавшая стандарт применения для многих глобальных и локальных моделей). При более адекватном анализе продуктивности действующие факторы не «расцепляются» (Adams et al., 2004; IPCC, 2021).

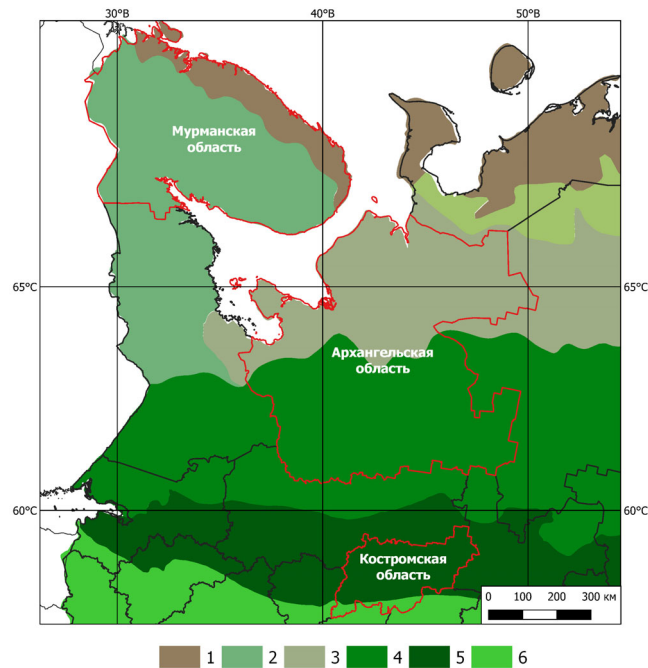
Цель работы: используя простую модель продуктивности, количественно проверить справедливость «тезиса Nemani» для лесов Северо-Запада Европейской территории России до 2100 года при одном из вероятных клима-

---

тических сценариев. Среднегодовая температура растет в России приблизительно в 2.5 раза быстрее, чем среднеглобальная, а в Арктике еще быстрее – в 3.5 раза (Qian et al., 2010; Доклад о научно-методических основах..., 2020). Так как большая часть лесов располагается в северных широтах, лесные биомы будут под усиленным влиянием изменений климата. Потенциально, именно здесь можно ожидать смены лимитирования факторов  $T, P$ ; поскольку обе эти величины растут со временем, результат к концу столетия неочевиден.

Объектом исследования были выбраны территории трех субъектов Российской Федерации (СРФ): а) расположенные на Европейской территории России (СРФ в Азиатской части слишком гетерогенны из-за больших размеров), б) представительные для подзон северной, средней и южной тайги (тем самым расположенные в северной части Европейской территории России).

На территории Костромской области доминирует южнотаежный Ладожско-Вычегодский биом. В качестве репрезентативного участка средней тайги выбран юг Архангельской области, который занимает среднетаежный Ладожско-Вычегодский биом. Мурманская область преимущественно занята гипоарктическо-таежным Кольско-Карельским биомом (рис. 1).



**Рисунок 1.** Биомы рассматриваемых субъектов РФ (красный контур), где 1 – Кольско-Большеземельско-Тазовский тундровый биом, 2 – Кольско-Карельский гипоарктическо-таежный биом, 3 – Мезено-Печорский северотаежный биом, 4 – Ладожско-Вычегодский и Приуральский среднетаежные биомы, 5 – Ладожско-Вычегодский и Приуральский южнотаежные биомы, 6 – Смоленско-Приволжский и Вятко-Камский широколиственно-хвойные биомы (Биомы России, 2018)

**Figure 1.** Biomes of the considered subjects (red outline), where 1 – Kola-Bolshezemel'sko-Taz tundra biom, 2 – Kola-Karelian hypoarctic-taiga biom, 3 – Mezen'-Pechersky northern taiga biom, 4 – Ladoga-Vychegodsky and Priural'sky middle taiga biomes, 5 – Ladoga-Vychegodsky and Priural'sky southern taiga biomes, 6 – Smolensk-Volga and Vyatka-Kama broadleaf-coniferous biomes (Biomes of Russia, 2018)

**Таблица 1.** Основные параметры территорий, удельный запас и биомасса древостоя – средние по породам и занятым ими площадям (с учетом возрастных распределений)

**Table 1.** The main parameters of the territories, the specific stock and forest biomass – average for the species and their areas (taking into account age distributions)

Параметр	Мурманская область	Архангельская область	Костромская область
Площадь региона, км <sup>2</sup>	144902	330103	60211
Облесенная площадь, км <sup>2</sup>	51259	217468	43493
Доля облесенной площади	0.35	0.66	0.72
Число пород деревьев	5	11	13
Удельный запас, м <sup>3</sup> га <sup>-1</sup>	44.0	118.0	161.1
Биомасса древостоя, кг С м <sup>-2</sup>	1.74	4.70	5.82

### Климатические данные

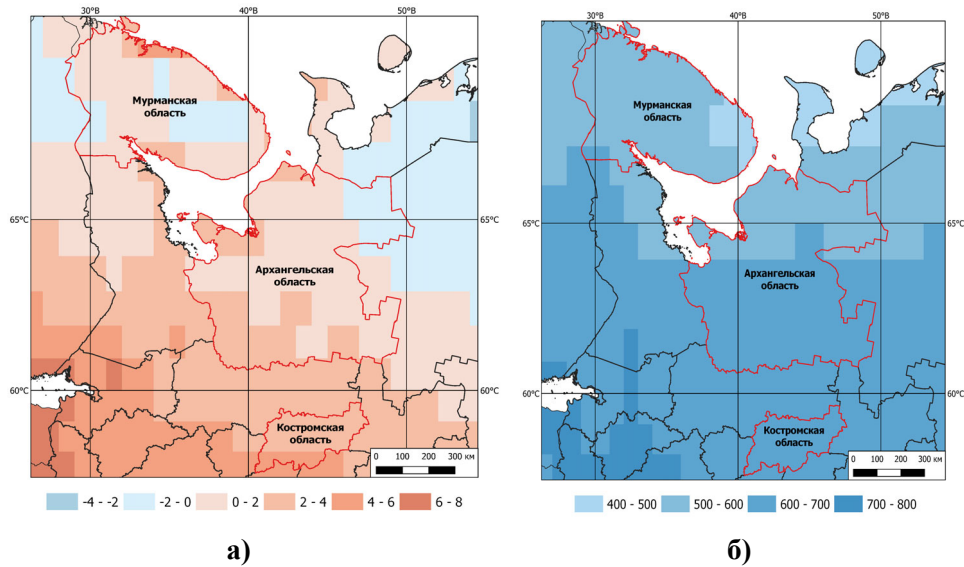
Использовался «умеренный» сценарий RCP4.5 воздействия парниковых газов и аэрозолей на климат. Имеется пять исходных временных интервалов  $s[k]$ . Текущие (рис. 2) и прогнозные метеополы  $T, P$  для наших трех территорий были получены: а) для интервала  $s1$  – реанализом данных (Rienecker et al, 2011; Xie, Arkin, 1998); б) для интервалов  $s2$ - $s5$  – специалистами ГГО усреднением по ансамблю из 31 модели CMIP5 (Катцов, Говоркова, 2013); в) для интервала  $s6$  значения  $T(2100), P(2100)$  получены нами экстраполяцией (табл. 2).

**Таблица 2.** Средние значения  $T, P$  для трех территорий (коды субъектов: 1147 – Мурманская область, 1111 - Архангельская область, 1134 - Костромская область). Указаны диапазоны и центры интервалов;  $nn$  – число градусных ячеек в регионе

**Table 2.** Average values of  $T, P$  for three territories (subject codes: 1147 – Murmansk region, 1111 – Arkhangelsk region, 1134 – Kostroma region). Ranges and centers of intervals are indicated;  $nn$  – the number of degree cells in the region

$T, ^\circ\text{C}$ интервал экстраполяция	$nn$	$s1$	$s2$	$s3$	$s4$	$s5$	$s6$
		1981-2000	2011-2030	2034-2053	2041-2060	2080-2099	2100
		1990	2020	2044	2050	2090	2100
Мурманская обл.	31	-1.0	0.7	1.9	2.2	3.4	3.5
Архангельская обл.	55	-0.2	1.4	2.5	2.7	3.8	4.0
Костромская обл.	9	2.0	3.4	4.5	4.7	5.6	5.8

$P, \text{мм год}^{-1}$ Интервал экстраполяция	$nn$	$s1$	$s2$	$s3$	$s4$	$s5$	$s6$
		1981-2000	2011-2030	2034-2053	2041-2060	2080-2099	2100
		1990	2020	2044	2050	2090	2100
Мурманская обл.	31	492	540	543	548	571	576
Архангельская обл.	55	571	611	624	629	631	632
Костромская обл.	9	621	663	672	674	693	696



**Рисунок 2.** а –  $T$ , среднегодовые температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ); б –  $P$ , годовые осадки ( $\text{мм год}^{-1}$ ) для временного интервала  $s_2$  (2020 г.) на Северо-Западе ЕТР (по Катцов, Говоркова, 2013)

**Figure 2.** а –  $T$ , average annual air temperatures ( $^{\circ}\text{C}$ ); б –  $P$ , annual precipitation ( $\text{mm year}^{-1}$ ) for the time interval  $s_2$  (2020) in the North-West of European Russia (according to Katcov, Govorkova, 2013)

Собственно модель Miami имеет вид (Alexandrov et al., 2002a):

$$\text{NPP} = \min(\text{NPPT}, \text{NPPP}), \text{ гСм} - 2 \text{ год} - 1 \quad (1)$$

где:

$$\text{NPPT} = a1 / (1 + \exp(a2 - a3 \times T)), \text{ гСм} - 2 \text{ год} - 1 \quad (2)$$

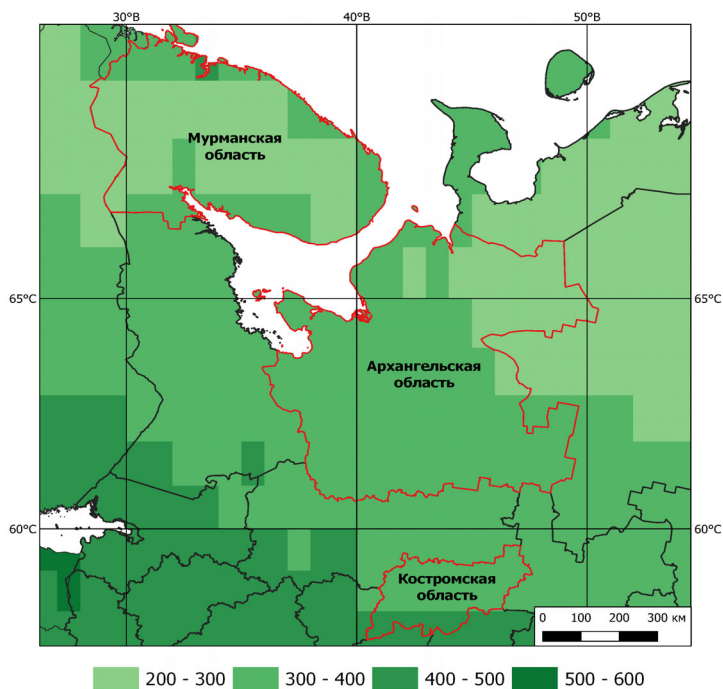
$$\text{NPPP} = a4 \times (1 - \exp(-a5 \times P)), \text{ гСм} - 2 \text{ год} - 1 \quad (3)$$

и

$$a1 = a4 = 1350; a2 = 1.315; a3 = 0.119; a5 = 0.000664 \quad (4)$$

Мы не пытались обобщать прогноз NPP, рассчитанный по модели Miami (далее NPP-miami), привлечением прогноза  $\text{CO}_2$ , так как в рамках данной модели мультипликативное включение зависимости NPP-miami ( $\text{CO}_2$ ) не меняет соотношение лимитирования ( $T, P$ ) (King et al., 1997).

Для дополнительного контроля метода нам показалось полезным сопоставить текущие значения NPP-miami с NPP из литературных источников. Для первых приводим карту (рис. 3) и средние величины для трех регионов (табл. 3); для вторых – выборку из многочисленных, весьма разнородных литературных источников (табл. 3). Как видим, NPP-miami находится в пределах типичных литературных величин.



**Рисунок 3.** NPP Северо-Запада ЕТР на основе расчетов по модели Miami для временного интервала s2 (2020 г.),  $г\ C\ м^{-2}\ год^{-1}$

**Figure 3.** NPP of the North-West of European Russia based on calculations by the Miami model for the time interval s2 (2020),  $g\ C\ m^{-2}\ year^{-1}$

**Таблица 3.** Типичные текущие значения NPP для бореальной зоны

**Table 3.** Typical NPP values for the boreal zone

NPP, $г\ C\ м^{-2}\ год^{-1}$	Источник	Метод	Комментарий
~340 302,324,388	Настоящая работа Среднее по трем регионам	Наш расчет по модели Miami для T (2020), P (2020)	Наш регион (рис. 1)  Соответственно, Мурман- ская, Архангельская, Костромская области
350-125	Anav et al., 2015, fig. 2	Дистанционно плюс гло- бальные модели	Глобальные зональные средние для 60-70oN
444	Kimball et al., 2006	Дистанционно плюс модель продуктивности	Бореальная зона
~400	Running et al., 2004,	Проект MODIS	Типичное значение для хвойных лесов
~250-300 ~350-400 ~450	Running, Zhao, 2021	Дистанционно	Наш регион (рис. 1),  Соответственно, Мурман- ская, Архангельская, Костромская области

Продолжение таблицы 3

$NPP, \text{г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$	Источник	Метод	Комментарий
464	Zhao et al., 2011	Дистанционно	Вечнозеленый хвойный лес (не только тайга)
342±106	Наш обзор 40 литературных источников	Среднее	Бореальная зона
275±39	Alexandrov et al., 2002a	Среднее по 6 глобальным моделям, использовали базу данных по NPP	Хвойные леса
~ 350	Luysaert et al., 2007, fig 4a	Наземные измерения	Влажный хвойный лес при $-10\text{C} \leq T \leq +50\text{C}$
350-400	Pregitzer, Euskirchen, 2004, fig. 1	Наземные измерения	Бореальная зона
200-400	Running et al., 2004	Проект MODIS	Наш регион
~ 400	Zaks et al., 2007	Модель Miami для T(2020), P(2020)	Наш регион (рис. 1), оценка с карты
436	Швиденко, Щепаченко, 2014	Наземные измерения (наш расчет по табл. 1, 4)	Бореальная зона ЕТР

## Результаты

Представлены в нескольких вариантах:

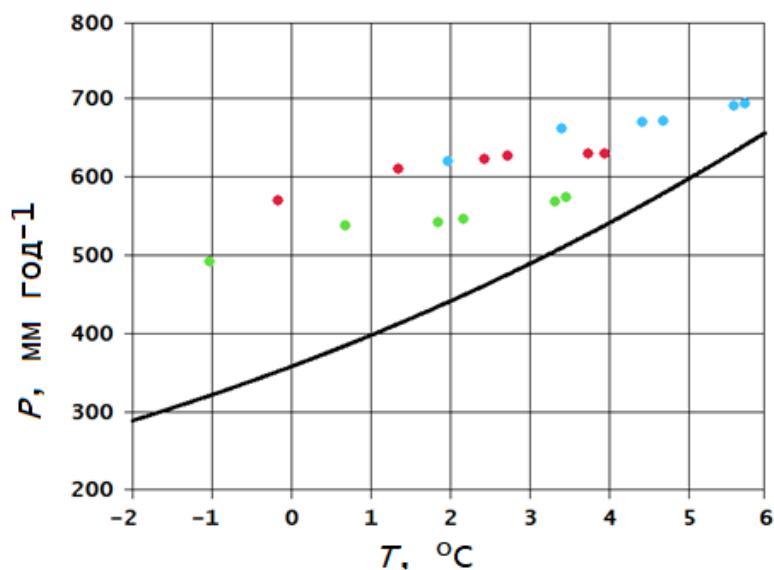
1. Приравняв зависимости (2) и (3), получим критическую кривую

$$f(T, P) = a1/(1 + \exp(a2 - a3 \times T)) - a4 \times (1 - \exp(-a5 \times P)) = 0 \quad (5)$$

На плоскости  $(T, P)$  процедура выделяет две области лимитирования (рис. 4): выше кривой  $(f(T, P) < 0)$  находится область лимитирования температурой, ниже  $(f(T, P) > 0)$  – осадками. Нанесение точек, соответствующих значениям  $(T, P)$  для трех регионов, показывает, что во всех случаях до 2100 года сохраняется лимитирование продуктивности температурой.

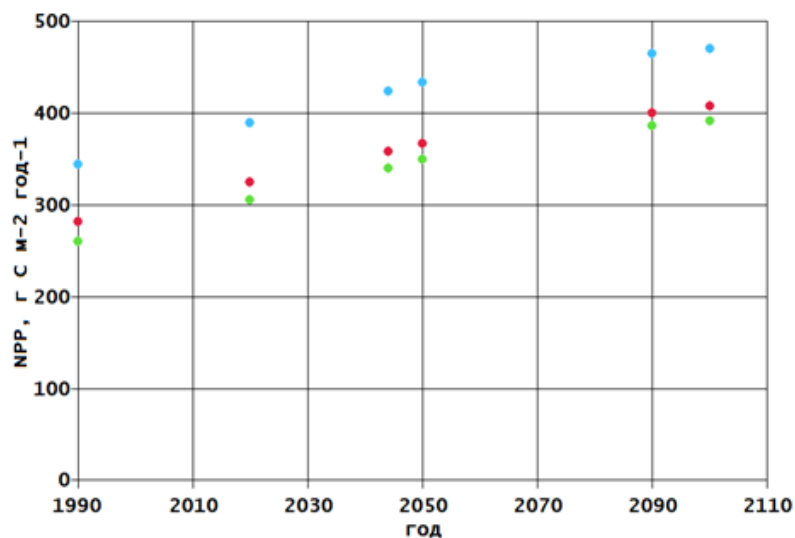
2. Собственно динамика  $NPP(t)$  приведена на рис. 5. Средний удельный прирост  $NPP$  за 1990-2100 гг. составляет примерно 36% ( $3.6\% \text{ год}^{-1}$ ).

3. В качестве иллюстрации приведем две карты для нашего региона с областями лимитирования  $(T, P)$  для начального и конечного климатических временных интервалов (рис. 6).



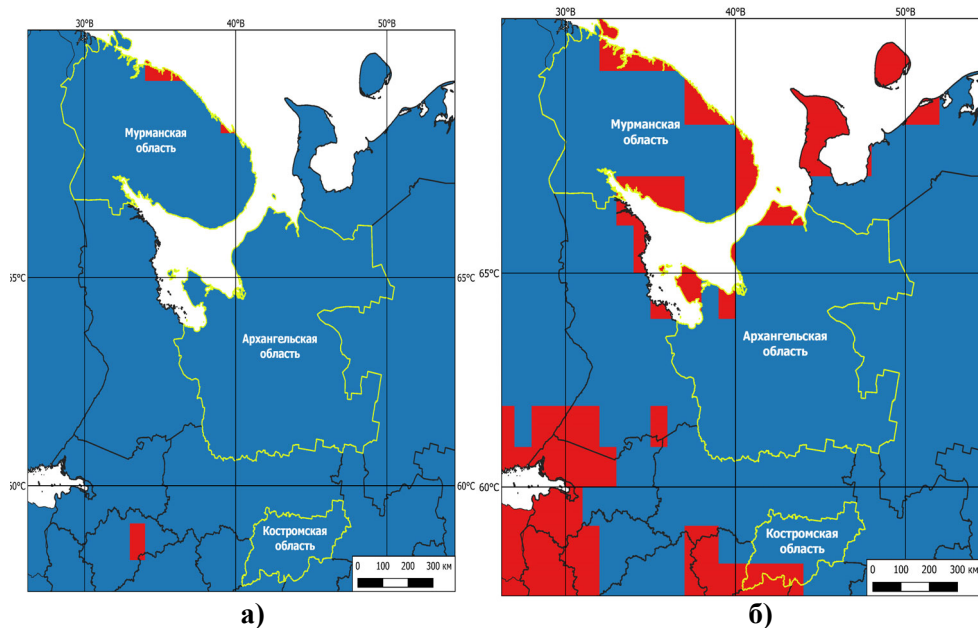
**Рисунок 4.** Критическая кривая (5), разделяющая области лимитирования NPP температурой (выше кривой) и осадками (ниже нее)  
 Точки соответствуют значениям  $(T, P)$  для трех регионов: ● Мурманская область, ● Архангельская область, ● Костромская область (взяты из табл. 2)

**Figure 4.** Critical curve (5) separating the areas of NPP limitation by temperature (above the curve) and precipitation (below it)  
 The points correspond to the values  $(T, P)$  for three regions: ● Murmansk region, ● Arkhangelsk region, ● Kostroma region (from Table 2)



**Рисунок 5.** Динамика  $NPP(t)$ , найденная по модели Мiами при  $(T, P)$ , взятых из табл. 2.  
 Точки соответствуют значениям  $(T, P)$  для трех регионов: ● Мурманская область, ● Архангельская область, ● Костромская область

**Figure 5.** Dynamics of  $NPP(t)$  found by the Miami model at  $(T, P)$  taken from Table 2  
 The points correspond to the values  $(T, P)$  for three regions: ● Murmansk region, ● Arkhangelsk region, ● Kostroma region



**Рисунок 6.** Области лимитирования ( $T, P$ ) для РФ и ближайших стран, найденные по модели Miami

*Взяты два крайних временных интервала: а – s1 (1990 г.), б – s5 (2090 г.). Синие области соответствуют лимитированию продуктивности температурой, красные – осадками*

**Figure 6.** Limitation areas ( $T, P$ ) for the Russian Federation and neighboring countries, found using the Miami model

*Two extreme time intervals are taken: (a) s1 (1990) and (b) s5 (2090). Blue areas correspond to productivity limitation by temperature, red areas – by precipitation*

## Обсуждение

Сопоставление полученных значений NPP-miami (табл. 3, рис. 5) с ансамблем литературных значений NPP показывают разумность наших оценок.

Полученные значения NPP-miami для текущего климата s2 (2020 г.) (рис. 3) для приморских частей Мурманской области схожи со значениями NPP-miami лесных экосистем Архангельской области, в результате чего среднее значение NPP Мурманской области попадает в градацию NPP Архангельской области. Подобная повышенная продуктивность не свойственна экосистемам Арктики, в нашем случае – кустарничковым тундрам. В реальности, она принимает минимальные значения в этой зоне, что связано с особенностями природных условий территории – низкими  $T, P$  (Национальный атлас России, 2007). Вероятно, требует отдельного рассмотрения вопрос расчета NPP в зоне контакта природных систем суши и вод Северного Ледовитого океана.

Прогнозные значения NPP немногочисленны. Согласно авторам Sheffield Dynamic Global Vegetation Model (Woodward, Lomas, 2004), для нашего региона ожидается изменение  $NPP(2000) \sim 350$  до  $NPP(2000) \sim 650$ . Хотя и не прогнозный, но долговременный тренд  $GPP$  (Gross Primary Production) за 1982-2000 гг. для растительности Арктики, полученный по дан-

ным радиометра NOAA AVHRR (Sitch et al., 2007), дает для нашего региона прирост  $GPP$  (1-5) ( $\text{г С м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ ). Недавно опубликованные результаты наблюдений за глобальной поглощенной РНAR за 1988-2019 гг. (Gulev et al., 2021, fig. 2.33) для нашего региона говорят о росте  $GPP$  в 1-2%, тем самым и  $NPP$ . Данные по AVHRR и MODIS за последние 40 лет также говорят о росте биомассы листвы и зелени растительного покрова (Piao et al., 2020).

Нарушения растительного покрова, «отбрасывающие» растительность к начальным стадиям демутиационной сукцессии (зарастание залежных земель для бывших сельскохозяйственных угодий; пожары и рубки для лесов), должны вести к уменьшению  $NPP$  территории. Имеет ли место последнее для лесов наших территорий – вопрос отдельный; в частности, мы не знаем изменения сукцессионного статуса частей наших территорий. Рост  $NPP$  территорий происходит также и из-за роста  $\text{CO}_2$ . Модель Miami в стандартном варианте  $\text{CO}_2$  явно не содержит, однако, если принять, что рост  $\text{CO}_2$  влияет на  $NPP$  независимо от  $T$ ,  $P$ , то наш основной результат – сравнительное лимитирование  $NPP$  факторами  $T$ ,  $P$  измениться не должен.

Наш результат (рис. 4) говорит об относительном росте  $NPP$ :  $\Delta NPP \sim 0.36$  (за 100 лет XXI века). Следуя (Woodward, Lomas, 2004),  $\Delta NPP \sim 0.40$  (за 100 лет XXI века); по (Kimball et al. 2006), экстраполяция к 2100 от 1982-2000 дает  $\Delta NPP \sim 0.093$ ; по (Grosso et al., 2008), экстраполяция к 2100 от 1901-2000 дает  $\Delta NPP \sim 0.14$ ; по (Ge et al, 2013) для северной половины Финляндии к 2100 г.  $\Delta NPP \sim 0.17-0.25$ . Следуя расчетам по модели EFIMOD (Моделирование динамики..., 2007), для бореальных лесов за 150 лет  $\Delta NPP \sim 0.12$ .

Высокий разброс результатов даже для настоящего времени естественно объясняется сложной организацией объекта и техническими трудностями измерений. Разумеется, встречаются результаты, не соответствующие общей тенденции (Turner et al., 2003).

## Список литературы

*Биомы России* (2018) Карта, М 1:7 500 000, М., WWF.

*Доклад о научно-методических основах для разработки стратегий адаптации к изменениям климата в Российской Федерации (в области компетенции Росгидромета)* (2020) СПб., Саратов, Амирит, 120 с.

Катцов, В.М., Говоркова, В.А. (2013) Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха, осадков и годового стока на территории России в XXI-м веке: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5), *Труды ГГО*, № 569, с. 76-98.

*Моделирование динамики органического вещества в лесных экосистемах* (2007) Под ред. В.Н. Кудеярова, Наука, Москва, 380 с.

*Национальный атлас России* (2007) Роскартография, Т2, Москва.

Швиденко, А.З., Щепаченко, Д.Г. (2014) Углеродный бюджет лесов России, *Сибирский лесной журнал*, № 1, с. 69-92.

Adams, B., White, A., Lenton, T.M. (2004) An analysis of some diverse approaches to modelling terrestrial net primary productivity, *Ecological Modelling*, vol. 177, no. 3-4, pp. 353-391.

Alexandrov, G.A., Yamagata, Y., Oikawa, T. (2002a) The scheme for globalization of a process-based model explaining gradations in terrestrial NPP and its application, *Ecological Modelling*, vol. 148, no. 2, pp. 293-306.

Alexandrov, G.A., Oikawa, T. (2002b) TsuBiMo: a biosphere model of the CO<sub>2</sub> fertilization effect, *Climate Research*, vol. 19, no. 3, pp. 265-270.

Anav, A., Friedlingstein, P., Beer, C., Ciais, P., Harper, A., Jones, C., Murray-Tortarolo, G., Papale, D., Parazoo, N.C., Peylin, P., Piao, S., Sitch, S., Viovy, N., Wiltshire, A., Zhao, M. (2015) Spatiotemporal patterns of terrestrial gross primary production. A review, *Reviews in Geophysics*, vol. 53, pp. 785-818, doi:10.1002/2015RG000483.

Beer C., Reichstein M., Tomelleri E., Ciais P., Jung M., et al. (2010). Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate, *Science*, vol. 329, pp. 834-838.

Bergh, J., Freeman, M., Sigurdsson, B., Kellomäki, S., Laitinen, K., Niinistö, S., Peltola, H., Linder, S. (2003) Modelling short-term effects of climate change on the productivity of selected tree species in Nordic countries, *Forest Ecology and Management*, vol. 183, no. 1-3, pp. 327-340, doi:10.1016/S0378-1127(03)00117-8.

Briceño-Elizondo, E., Garcia-Gonzalo, J., Peltola, H., Matala, J., Kellomäki, S. (2006) Sensitivity of growth of Scots pine, Norway spruce and silver birch to climate change and forest management in boreal conditions, *Forest Ecology and Management*, vol. 232, no. 1-3, pp. 152-167, doi:10.1016/j.foreco.2006.05.062.

Farquhar, G.D., von Cammerer, S., Berry, J.A. (1980) A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species, *Planta*, vol. 149, no. 1, pp. 78-90.

Ge, Z.M., Kellomäki, S., Peltola, H., Zhou, X., Väisänen, H., Strandman, H. (2013) Impacts of climate change on primary production and carbon sequestration of boreal Norway spruce forests: Finland as a model, *Climatic Change*, vol. 118, no. 2, pp. 259-273, doi:10.1007/s10584-012-0607-1.

Grosso, S.D., Parton, W., Stohlgren, T., Zheng, D., Bachelet, D., Prince, S., Hibbard, K., Olson, R. (2008) Global potential net primary production predicted from vegetation class, precipitation, and temperature, *Ecology*, vol. 89, no. 8, pp. 2117-2126.

Gulev, S.K., Thorne, P.W., Ahn, J., Dentener, F.J., Domingues, C.M., Gerland, S., Gong, D., Kaufman, D.S., Nnamchi, H.C., Quaas, J., Rivera, J.A., Sathyendranath, S., Smith, S.L., Trewin, B., von Schuckmann, K., Vose, R.S. (2021) Changing State of the Climate System, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A.

---

Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekzi, R. Yu, B. Zhou eds., Cambridge, N.Y.: Cambridge University Press, pp. 287-422, doi:10.1017/9781009157896.004.

IPCC (2021) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekzi, R. Yu, B. Zhou eds., Cambridge, N.Y.: Cambridge University Press, 2391 p., doi:10.1017/9781009157896.

Kimball, J.S., Zhao, M., McDonald, K.C., Running, S.W. (2006) Satellite Remote Sensing of Terrestrial Net Primary Production for the Pan-Arctic Basin and Alaska, *Mitigation and Adaptation strategies for Global Change*, vol. 11, no. 4, pp. 783-804.

King, A.W., Post, W.M., Wullshleger, S.D. (1997) The potential response of terrestrial carbon storage to change in climate and atmospheric CO<sub>2</sub>, *Climate Change*, vol. 35, no. 2, pp. 199-227.

Lieth, H. (1975) Modelling the primary productivity of the world, *Primary Productivity of the Biosphere*, H. Lieth, R.H. Whittaker eds., N.Y. Springer-Verlag, pp. 237-263.

Luyssaert, S., Inglima, I., Jung, M., Richardson, A.D., Reichstein, M., Papale, D., Piao, S.L., Schulze, E.-D., Wingate, L., Matteucci, G., Aragao, L., Aubinet, M., Beer, C., Bernhofer, C., Black, K.G., Bonal, D., Bonnefond, J.-M., Chambers, J., Ciais, P., Cook, B., Davis, K.J., Dolman, A.J., Gielen, B., Goulden, M., Grace, J., Granier, A., Grelle, A., Griffis, T., Grünwald, T., Guidolotti, G., Hanson, P.J., Harding, R., Hollinger, D.Y., Hutrya, L.R., Kolari, P., Kruijt, B., Kutsch, W., Lagergren, F., Laurila, T., Law, B.E., Le Maire, G., Lindroth, A., Loustau, D., Malhi, Y., Mateus, J., Miglavacca, M., Misson, L., Montagnani, L., Moncrieff, J., Moors, E., Munger, J.W., Nikinmaa, E., Ollinger, S.V., Pita, G., Rebmann, C., Rouspard, O., Saigusa, N., Sanz, M.J., Seufert, G., Sierra, C., Smith, M.-L., Tang, J., Valentini, R., Vesala, T., Janssens, I.A. (2007) The CO<sub>2</sub>-balance of boreal, temperate and tropical forests derived from a global database, *Global Change Biology*, vol. 13, no. 12, pp. 2502-2537.

Nemani, R.R., Keeling, C.D., Hashimoto, H., Jolly, W.M., Piper, S.C., Tucker, C.J., Myneni, R.B., Running, S.W. (2003) Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999, *Science*, vol. 300, no. 5625, pp. 1560-1563.

Piao, S., Wang, X., Wang, K., Li, X., Bastos, A., Canadell, J.G., Ciais, P., Friedlingstein, P., Sitch, S. (2020) Interannual variation of terrestrial carbon cycle: Issues and perspectives, *Global Change Biology*, vol. 26, no. 1, pp. 300-318, doi:10.1111/gcb.14884.

---

Pregitzer, K.S., Euskirchen, E.S. (2004) Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age, *Global Change Biology*, vol. 10, no. 12, pp. 2052-2077.

Qian, H., Joseph, R., Zeng, N. (2010) Enhanced terrestrial carbon uptake in the Northern High Latitudes in the 21st century from the Coupled Carbon Cycle Climate Model Intercomparison Project model projections, *Global Change Biology*, vol. 16, no. 2, pp. 641-656.

Rienecker, M.M., Suárez, M.J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J.T., Liu, E., Bosilovich, M.G., Schubert, S., Takacs, L., Kim, G., Bloom, S.C., Chen, J., Collins, D., Conaty, A., Silva, A.M., Gu, W., Joiner, J., Koster, R.D., Lucchesi, R., Molod, A., Owens, T., Pawson, S., Pegion, P.J., Redder, C.R., Reichle, R.H., Robertson, F.R., Ruddick, A.G., Sienkiewicz, M., & Woollen, J.S. (2011) MERRA – NASA’s Modern-Era Retrospective, *Journal of Climate*, vol. 24, no. 14, pp. 3624-3648.

Running, S.W., Nemani, R.R., Heinsch, F.A., Zhao, M., Reeves, M., Hashimoto, H. (2004) A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production, *BioScience*, vol. 54, no. 6, pp. 547-560.

Running, S.W., Zhao, M. (2021) *User’s Guide Daily GPP and Annual NPP (MOD17A2H/A3H) and Year-end GapFilled (MOD17A2HGF/A3HGF) Products* NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6.1), 38 p.

Sallaba, F., Lehsten, D., Seaquist, J., Sykes, M.T. (2015) A rapid NPP meta-model for current and future climate and CO<sub>2</sub> scenarios in Europe, *Ecological Modelling*, vol. 302, pp. 29-41.

Salminen, H., Jalkanen, R. (2005) Modelling the effect of temperature on height increment of Scots pine at high latitudes, *Silva Fennica*, vol. 39, no. 4, pp. 497-508.

Saxe, H., Cannell, M.G.R., Johnsen, O., Ryan, M.G., Vourlitis, G. (2001) Tree and forest functioning in response to global warming, *New Phytologist*, vol. 149, no. 3, pp. 369-400, doi:10.1046/j.1469-8137.2001.00057.x.

Torsson, P., Strandman, H., Kellomäki, S., Kilpeläinen, A., Jylhä, K., Asikainen, A., Peltola, H. (2015) Do we need to adapt the choice of main boreal tree species in forest regeneration under the projected climate change? *Forestry*, vol. 88, no. 5, pp. 564-572, doi:10.1093/forestry/cpv023.

Turner, D.P., Ritts, W.D., Cohen, W.B., Gower, S.T., Zhao, M., Running, S.W., Wofsy, S.C., Urbanski, S.P., Dunn, A.L., & Munger, J.W. (2003) Scaling Gross Primary Production (GPP) over boreal and deciduous forest landscapes in support of MODIS GPP product validation, *Remote Sensing of Environment*, vol. 88, pp. 256-270.

Woodward, F.I., Lomas, M.R. (2004) Vegetation dynamics – simulating responses to climate change, *Biological Reviews*, vol. 79, no. 3, pp. 643-670.

---

Xie, P., Arkin, P.A. (1998) Global Monthly Precipitation Estimates from Satellite-Observed Outgoing Longwave Radiation, *Journal of Climate*, vol. 11, no. 2, pp. 137-164.

Zaks, D.P.M., Ramankutty, N., Barford, C.C., Foley, J.A. (2007) From Miami to Madison: Investigating the relationship between climate and terrestrial net primary production, *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 21, no. 3, p. GB3004, doi:10.1029/2006GB002705.

Zhao, M., Running, S., Heinsch, F.A., Nemani, R. (2011) MODIS-Derived Terrestrial Primary Production, *Land Remote Sensing and Global Environmental Change*, B. Ramachandran, C. Justice, M. Abrams eds., N.Y. Springer, pp. 635-660, doi:10.1007/978-1-4419-6749-7\_28.

## References

*Biomy Rossii* [Biomes of Russia] (2018) Map, 1:7 500 000, WWF, Moscow, Russia.

*Doklad o nauchno-metodicheskikh osnovah dlya razrabotki strategij adaptacii k izmeneniyam klimata v Rossijskoj Federacii (v oblasti kompetencii Rosgidrometa)* [Report on the scientific and methodological foundations for developing climate change adaptation strategies in the Russian Federation (within the competence of Roshydromet)] (2020) SPb., Amirit, Saratov, Russia, 120 p.

Katcov, V.M., Govorkova, V.A. (2013) Ozhidaemye izmeneniya prizemnoj temperatury vozduha, osadkov i godovogo stoka na territorii Rossii v XXI-m veke: rezul'taty raschetov s pomoshch'yu ansamblya global'nyh klimaticheskikh modelej (CMIP5) [Expected changes in surface air temperature, precipitation and annual runoff on the territory of Russia in the 21st century: results of calculations using an ensemble of global climate models (CMIP5)], *Trudy GGO*, no. 569, pp. 76-98.

*Modelirovanie dinamiki organicheskogo veshchestva v lesnyh ekosistemah* [Modeling of organic matter dynamics in forest ecosystems] (2007) Ed. V.N. Kudeyarov, Nauka, Moscow, Russia, 380 p.

*Nacional'nyj atlas Rossii* [National Atlas of Russia] (2007) Roskartografiya, Moscow, Russia, vol. 2.

Shvidenko, A.Z., Shchepashchenko, D.G. (2014) Uglerodnyj byudzhnet lesov Rossii [Carbon budget of Russian forests], *Sibirskij lesnoj zhurnal*, no. 1, pp. 69-92.

Adams, B., White, A., Lenton, T.M. (2004) An analysis of some diverse approaches to modelling terrestrial net primary productivity, *Ecological Modelling*, vol. 177, no. 3-4, pp. 353-391.

Alexandrov, G.A., Yamagata, Y., Oikawa, T. (2002a) The scheme for globalization of a process-based model explaining gradations in terrestrial NPP and

---

its application, *Ecological Modelling*, vol. 148, no. 2, pp. 293-306.

Alexandrov, G.A., Oikawa, T. (2002b) TsuBiMo: a biosphere model of the CO<sub>2</sub> fertilization effect, *Climate Research*, vol. 19, no. 3, pp. 265-270.

Anav, A., Friedlingstein, P., Beer, C., Ciais, P., Harper, A., Jones, C., Murray-Tortarolo, G., Papale, D., Parazoo, N.C., Peylin, P., Piao, S., Sitch, S., Viovy, N., Wiltshire, A., Zhao, M. (2015) Spatiotemporal patterns of terrestrial gross primary production: A review, *Reviews in Geophysics*, vol. 53, pp. 785-818, doi:10.1002/2015RG000483.

Bergh, J., Freeman, M., Sigurdsson, B., Kellomäki, S., Laitinen, K., Niinistö, S., Peltola, H., Linder, S. (2003) Modelling short-term effects of climate change on the productivity of selected tree species in Nordic countries, *Forest Ecology and Management*, vol. 183, no. 1-3, pp. 327-340, doi:10.1016/S0378-1127(03)00117-8.

Briceño-Elizondo, E., Garcia-Gonzalo, J., Peltola, H., Matala, J., Kellomäki, S. (2006) Sensitivity of growth of Scots pine, Norway spruce and silver birch to climate change and forest management in boreal conditions, *Forest Ecology and Management*, vol. 232, no. 1-3, pp. 152-167, doi:10.1016/j.foreco.2006.05.062.

Farquhar, G.D., von Cammerer, S., Berry, J.A. (1980) A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species, *Planta*, vol. 149, no. 1, pp. 78-90.

Ge, Z.M., Kellomäki, S., Peltola, H., Zhou, X., Väisänen, H., Strandman, H. (2013) Impacts of climate change on primary production and carbon sequestration of boreal Norway spruce forests: Finland as a model, *Climatic Change*, vol. 118, no. 2, pp. 259-273, doi:10.1007/s10584-012-0607-1.

Grosso, S.D., Parton, W., Stohlgren, T., Zheng, D., Bachelet, D., Prince, S., Hibbard, K., Olson, R. (2008) Global potential net primary production predicted from vegetation class, precipitation, and temperature, *Ecology*, vol. 89, no. 8, pp. 2117-2126.

Gulev, S.K., Thorne, P.W., Ahn, J., Dentener, F.J., Domingues, C.M., Gerland, S., Gong, D., Kaufman, D.S., Nnamchi, H.C., Quaas, J., Rivera, J.A., Sathyendranath, S., Smith, S.L., Trewin, B., von Schuckmann, K., Vose, R.S. (2021) Changing State of the Climate System, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekzi, R. Yu, B. Zhou eds., Cambridge, N.Y.: Cambridge University Press, pp. 287-422, doi:10.1017/9781009157896.004.

IPCC (2021) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I.

---

---

Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekzi, R. Yu, B. Zhou eds., Cambridge, N.Y.: Cambridge University Press, 2391 p., doi:10.1017/9781009157896.

Kimball, J.S., Zhao, M., McDonald, K.C., Running, S.W. (2006) Satellite Remote Sensing of Terrestrial Net Primary Production for the Pan-Arctic Basin and Alaska, *Mitigation and Adaptation strategies for Global Change*, vol. 11, no. 4, pp. 783-804.

King, A.W., Post, W.M., Wullshleger, S.D. (1997) The potential response of terrestrial carbon storage to change in climate and atmospheric CO<sub>2</sub>, *Climate Change*, vol. 35, no. 2, pp. 199-227.

Lieth, H. (1975) Modelling the primary productivity of the world, *Primary Productivity of the Biosphere*, H. Lieth, R.H. Whittaker eds., N.Y.: Springer-Verlag, pp. 237-263.

Luysaert, S., Inglima, I., Jung, M., Richardson, A.D., Reichstein, M., Papale, D., Piao, S.L., Schulze, E.-D., Wingate, L., Matteucci, G., Aragao, L., Aubinet, M., Beer, C., Bernhofer, C., Black, K.G., Bonal, D., Bonnefond, J.-M., Chambers, J., Ciais, P., Cook, B., Davis, K.J., Dolman, A.J., Gielen, B., Goulden, M., Grace, J., Granier, A., Grelle, A., Griffis, T., Grünwald, T., Guidolotti, G., Hanson, P.J., Harding, R., Hollinger, D.Y., Hutyrá, L.R., Kolari, P., Kruijt, B., Kutsch, W., Lagergren, F., Laurila, T., Law, B.E., Le Maire, G., Lindroth, A., Loustau, D., Malhi, Y., Mateus, J., Miglavacca, M., Misson, L., Montagnani, L., Moncrieff, J., Moors, E., Munger, J.W., Nikinmaa, E., Ollinger, S.V., Pita, G., Rebmann, C., Rouspard, O., Saigusa, N., Sanz, M.J., Seufert, G., Sierra, C., Smith, M.-L., Tang, J., Valentini, R., Vesala, T., Janssens, I.A. (2007) The CO<sub>2</sub>-balance of boreal, temperate and tropical forests derived from a global database, *Global Change Biology*, vol. 13, no. 12, pp. 2502-2537.

Nemani, R.R., Keeling, C.D., Hashimoto, H., Jolly, W.M., Piper, S.C., Tucker, C.J., Myneni, R.B., Running, S.W. (2003) Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999, *Science*, vol. 300, no. 5625, pp. 1560-1563.

Piao, S., Wang, X., Wang, K., Li, X., Bastos, A., Canadell, J.G., Ciais, P., Friedlingstein, P., Sitch, S. (2020) Interannual variation of terrestrial carbon cycle: Issues and perspectives, *Global Change Biology*, vol. 26, no. 1, pp. 300-318, doi:10.1111/gcb.14884.

Pregitzer, K.S., Euskirchen, E.S. (2004) Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age, *Global Change Biology*, vol. 10, no. 12, pp. 2052-2077.

Qian, H., Joseph, R., Zeng, N. (2010) Enhanced terrestrial carbon uptake in the Northern High Latitudes in the 21st century from the Coupled Carbon Cycle Climate Model Intercomparison Project model projections, *Global Change Biology*, vol. 16, no. 2, pp. 641-656.

Rienecker, M.M., Suárez, M.J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J.T., Liu,

---

---

E., Bosilovich, M.G., Schubert, S., Takacs, L., Kim, G., Bloom, S.C., Chen, J., Collins, D., Conaty, A., Silva, A.M., Gu, W., Joiner, J., Koster, R.D., Lucchesi, R., Molod, A., Owens, T., Pawson, S., Pegion, P.J., Redder, C.R., Reichle, R.H., Robertson, F.R., Ruddick, A.G., Sienkiewicz, M., & Woollen, J.S. (2011) MERRA – NASA’s Modern-Era Retrospective, *Journal of Climate*, vol. 24, no. 14, pp. 3624-3648.

Running, S.W., Nemani, R.R., Heinsch, F.A., Zhao, M., Reeves, M., Hashimoto, H. (2004) A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production, *BioScience*, vol. 54, no. 6, pp. 547-560.

Running, S.W., Zhao, M. (2021) User’s *Guide Daily GPP and Annual NPP (MOD17A2H/A3H) and Year-end Gap Filled (MOD17A2HGF/A3HGF) Products* NASA Earth Observing System MODIS Land Algorithm (For Collection 6.1), 38 p.

Sallaba, F., Lehsten, D., Seaquist, J., Sykes, M.T. (2015) A rapid NPP meta-model for current and future climate and CO<sub>2</sub> scenarios in Europe, *Ecological Modelling*, vol. 302, pp. 29-41.

Salminen, H., Jalkanen, R. (2005) Modelling the effect of temperature on height increment of Scots pine at high latitudes, *Silva Fennica*, vol. 39, no. 4, pp. 497-508.

Saxe, H., Cannell, M.G.R., Johnsen, O., Ryan, M.G., Vourlitis, G. (2001) Tree and forest functioning in response to global warming, *New Phytologist*, vol. 149, no. 3, pp. 369-400, doi:10.1046/j.1469-8137.2001.00057.x.

Sitch S., McGuire A.D., Kimball J., Gedney N., Gamon J., Engstrom R., Wolf A., Zhuang Q., Clein J., and McDonald K.C. (2007) Assessing the carbon balance of circumpolar Arctic tundra using remote sensing and process modeling, *Ecological Applications*, vol. 17, no. 1, pp. 213-234.

Torsson, P., Strandman, H., Kellomäki, S., Kilpeläinen, A., Jylhä, K., Asikainen, A., Peltola, H. (2015) Do we need to adapt the choice of main boreal tree species in forest regeneration under the projected climate change? *Forestry*, vol. 88, no. 5, pp. 564-572, doi:10.1093/forestry/cpv023.

Turner, D.P., Ritts, W.D., Cohen, W.B., Gower, S.T., Zhao, M., Running, S.W., Wofsy, S.C., Urbanski, S.P., Dunn, A.L., & Munger, J.W. (2003) Scaling Gross Primary Production (GPP) over boreal and deciduous forest landscapes in support of MODIS GPP product validation, *Remote Sensing of Environment*, vol. 88, pp. 256-270.

Woodward, F.I., Lomas, M.R. (2004) Vegetation dynamics – simulating responses to climate change, *Biological Reviews*, vol. 79, no. 3, pp. 643-670.

Xie, P., Arkin, P.A. (1998) Global Monthly Precipitation Estimates from Satellite-Observed Outgoing Longwave Radiation, *Journal of Climate*, vol. 11, no. 2, pp. 137-164.

Zaks, D.P.M., Ramankutty, N., Barford, C.C., Foley, J.A. (2007) From Miami to Madison: Investigating the relationship between climate and terrestrial net

---

primary production, *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 21, no. 3, p. GB3004, doi:10.1029/2006GB002705.

Zhao, M., Running, S., Heinsch, F.A., Nemani, R. (2011) MODIS-Derived Terrestrial Primary Production, *Land Remote Sensing and Global Environmental Change*, B. Ramachandran, C. Justice, M. Abrams eds., N.Y. Springer, pp. 635-660, doi:10.1007/978-1-4419-6749-7\_28.

*Статья поступила в редакцию (Received): 21.01.2023.*

*Статья доработана после рецензирования (Revised): 15.02.2023.*

*Принята к публикации (Accepted): 24.02.2023.*

### **Для цитирования / For citation:**

Корзухин, М.Д., Андреева, А.П. (2023) Зависимость продуктивности лесов от температуры и осадков для северо-запада России: прогноз с использованием модели Miami, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 1, с. 89-106, doi:10.21513/2410-8758-2023-1-89-106.

Korzukhin, M.D., Andreeva, A.P. (2023) Dependence of forest productivity on temperature and precipitation for the north-west of Russia: a forecast using the Miami model, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 1, pp.89-106, doi:10.21513/2410-8758-2023-1-89-106.