

Климатический ареал непарного шелкопряда на территории России, соответствующий климатам конца XX века и XXI века

А.Ю. Богданович¹⁾*, Н.Ю. Добролюбов¹⁾, С.В. Крыленко¹⁾,
Ю.Н. Баранчиков²⁾, О.Н. Липка¹⁾, С.М. Семенов^{1,3)}

¹⁾ Институт глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля,
РФ, 107258, г. Москва, ул. Глебовская, д. 20Б

²⁾ Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН,
660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 28

³⁾ Институт географии РАН,
РФ, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29

*Адрес для переписки: bogda-anton@yandex.ru

Реферат. Непарный шелкопряд *Lymantria dispar* (L.) – опасный вредитель лесных и садовых пород деревьев. Он имеет глобальное распространение и является полифагом. В работе обсуждаются климатические условия, при которых этот вид может устойчиво существовать, т.е. его климатический ареал. Рассмотрены два основных условия: а) годовая сумма превышений среднесуточной температурой воздуха в приповерхностном слое значения 10.4°C (сумма эффективных температур – СЭТ) должна быть не меньше 500°C•сут и б) среднемесячная температура самого теплого месяца должна быть не больше 27°C. Для десятилетнего отрезка времени для каждого элемента пространственной сетки, по данным мониторинга климата, вычисляется число лет, для которых оба критерия выполняются. Исходя из этого числа лет, оценивается вероятность принадлежности этого элемента сетки климатическому ареалу вида. Построенный таким способом глобальный климатический ареал для климата 1990-1999 гг. удовлетворительно соответствует данным международных публикаций. С использованием описанного подхода и климатических данных Климатического центра Росгидромета¹⁾ в работе выполнена оценка климатического ареала *L. dispar* на территории России для климата 1990-1999 гг. по пространственной сетке 0.25° x 0.25°. Аналогичные расчеты проведены для климата 2030-2039 гг. и 2050-2059 гг. в условиях сценариев RCP4.5 и RCP8.5 и выполнены сравнения с данными расчета для 1990-1999 гг. В условиях сценария RCP4.5 климату 2030-2039 гг. будет соответствовать северная граница климатического ареала, продвинувшаяся на север вдоль 60-й параллели на 2-3 градуса в секторе 20-80° с.ш., а также до 4 градусов в секторе 110-130° с.ш. Для климата 2050-2059 гг. продвижение

¹⁾ Росгидромет – Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

будет более существенным. В условиях сценария RCP8.5 эти продвижения будут еще более выраженными.

Ключевые слова. Климатические критерии, непарный шелкопряд, территория России, климатический ареал, изменения, XXI век.

Climatic range of spongy moth in Russia corresponding to climates of the late 20th century and the 21st century

A.Yu. Bogdanovich^{1)*}, *N.Yu. Dobrolyubov*¹⁾, *S.V. Krylenko*¹⁾,
*Yu.N. Baranchikov*²⁾, *O.N. Lipka*¹⁾, *S.M. Semenov*^{1,3)}

¹⁾ Yu.A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology,
20B, Glebovskaya str., 107258, Moscow, Russian Federation

²⁾ V.N. Sukhachev Institute of Forests, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Akademgorodok, 50, building 28, 660036, Krasnoyarsk, Russian Federation

³⁾ Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,
29, Staromonetnyi lane, 119017, Moscow, Russian Federation

*Correspondence address: *bogda-anton@yandex.ru*

Abstract. The spongy moth *Lymantria dispar* (L.) is a dangerous pest of forest and horticultural trees. It has a global distribution and is a polyphage. The paper discusses the climatic conditions under which this species can stably exist, i.e. its climatic range. Two main conditions are considered: a) the annual sum of excesses of the average daily air temperature in the near-surface layer of 10.4°C (the sum of effective temperatures – SET) must not be less than 500°C·day, and b) the average monthly temperature of the warmest month must not exceed 27°C. For a ten-year period, the number of years for which both criteria are met is calculated for each element of the spatial grid using the climate monitoring data. Based on this number of years, the probability that this grid element belongs to the climatic range of the species is estimated. The global climatic area constructed in this way for the climate of 1990-1999 satisfactorily corresponds to the data of international publications. Using the described approach and climate data from the Climate Center of Roshydromet²⁾, we assessed the climatic range of *L. dispar* in Russia for the climate of 1990-1999 on a spatial grid 0.25° x 0.25°. Similar calculations were carried out for the climates of 2030-2039 and 2050-2059 under the conditions of RCP4.5 and RCP8.5 scenarios and comparisons were made with the computed data for 1990-1999. Under the RCP4.5 scenario, the northern boundary of climatic range corresponding to the climate of 2030-2039 will move northward along the 60th parallel by 2-3 degrees in the sector 20-80° N and up to 4 degrees in the sector 110-130° N. For climate of 2050-2059, the shift will be more significant. Under the RCP8.5 scenario, these shifts will be even more pronounced.

²⁾ Roshydromet – Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring.

Keywords. Climatic criteria, spongy moth, territory of Russia, climatic range, changes, 21st century.

Введение

Непарный шелкопряд – вид насекомых-фитофагов, способный к вспышкам массового размножения. Очаги его массовых размножений только в одном субъекте Российской Федерации могут занимать площади от несколько десятков до более чем полумиллиона гектаров в год (Колтунов, 2006; Пономарев и др., 2012; Лямцев, 2018). При этом ущерб для лесного хозяйства может быть весьма существенным. Так, ежегодный ущерб от непарного шелкопряда в США на 2011 год оценивался в 250 млн долларов (Aukema et al., 2011), а всего через 5 лет эта цифра увеличилась до 3.2 миллиардов долларов/год (Bradshaw et al., 2016). Динамика численности популяций непарного шелкопряда и его способность к расширению ареала определяется множеством факторов, среди которых существенную роль играет климат (Лямцев, 2013, 2018).

Современное таксономическое название непарного шелкопряда – *Lymantria dispar* (Linnaeus, 1758) (Lepidoptera, Erebidae). Расхожее название вида по-английски – gypsy moth – недавно было признано «дегуманитарным» (Lancette, 2021) и изменено Американским энтомологическим обществом на spongy moth (Osborne, 2022).

Различными исследователями выделяется несколько подвидов непарного шелкопряда (Pogue, Schaefer, 2007). На территории нашей страны встречаются три: *L. d. dispar* (Linnaeus, 1758) в Европейской части России, *L. d. asiatica* (Wnukowsky, 1926) в Сибири и на большей части Дальнего Востока, а также *L. d. japonica* (Motschulsky, 1860) на Сахалине и юге Приморья (Камаев и др., 2015). При этом ряд популяций *L. d. asiatica* и все популяции *L. d. japonica* формируют так называемую «азиатскую расу непарного шелкопряда», самки которой обладают способностью к активному полету и связанными с ней экологическими особенностями, главными из которых являются повышенная полифагия и устойчивость к абиотическим факторам внешней среды (Баранчиков, 1987; Baranchikov, 1989; Pogue, Schaefer, 2007; Srivastava et al., 2021). По этой причине «asian gypsy/spongy moth» входит в списки карантинных организмов большинства стран мира (Lowe et al., 2000).

Особи этого вида проходят полный цикл метаморфоза – яйцо, гусеница, куколка, имаго. Последняя стадия – крупная бабочка; самцы и самки сильно различаются размером и окраской (отсюда русское название: непарный шелкопряд). Длина переднего крыла самцов достигает 22 мм, самок – 30 мм, при этом крылья самцов имеют разные оттенки коричневого, а самок – белые с темными перевязями (Pogue, Schaefer, 2007). Бабочки этого вида не питаются. Ущерб растениям наносят гусеницы шелкопряда.

Список кормовых растений непарного шелкопряда превышает 500 видов, при этом в разных частях его ареала максимально повреждаются разные породы. В Европейской части России это дубы, разные представители семейств розоцветных, ивовых, березовых (Киреева, 1983; Лямцев, 2013). В

Сибири – в основном береза, лиственница, ивы (Кондаков, 1963; Колтунов, 2006; Бахвалов и др., 2010; Пономарев и др., 2012). На Дальнем Востоке – дубы (Юрченко, Турова, 1988). На Североамериканском континенте шелкопряд может питаться на 450 видах растений, но максимально пригодных для его развития всего 148 (Liebhold et al., 1995). Гусеницы азиатских популяций шелкопряда могут проходить развитие на ряде видов вечнозеленых хвойных (Keena, Richards, 2020).

Непарный шелкопряд дает одно поколение в год. В условиях климата Европейской части России самка откладывает яйца в июле-августе, в Азиатской части России – в августе-сентябре. Количество яиц в одной кладке колеблется в пределах от 100 и до 500, в отдельных случаях до 1500 яиц, при этом плодовитость летающих самок азиатских популяций существенно ниже. Формирование гусениц в яйце происходит на 20-48 день, в зависимости от температуры, после чего они уходят в зимнюю диапаузу, которая длится несколько месяцев (Gray et al., 1995). Гусеницы отрождаются из яйца в апреле-мае. Их питание продолжается до 10 недель, в течение которых они проходят 5 (самцы) или 6 (самки) гусеничных возрастов. Окукливание происходит в кронах кормовых растений в редком коконе.

Стадия куколки продолжается 10-20 дней. Бабочки-самцы появляются из куколок первыми, самки – на 4-7 дней позже. Самцы летают во второй половине дня и в начале ночи. Самки европейских (и американских) популяций не способны к активному полёту, хотя и имеют вполне развитые крылья (Srivastava et al., 2021). В азиатской части ареала самки в темное время обычно перелетают из мест отрождения в новые местообитания, при этом миграция может составлять десятки километров (Рожков, Васильева, 1982; Баранчиков, 1987). Бабочки живут не дольше двух недель. Самцы полигамны и могут спариваться несколько раз. Оплодотворенная самка откладывает яйца немедленно либо в течение максимум недели после копуляции, после чего погибает.

Непарный шелкопряд имеет обширный географический (т.е. фактический) ареал. Вид встречается по всей Европе, в Малой Азии, в горах Средней Азии, на Кавказе, в южной Сибири, на российском Дальнем Востоке, северо-восточном Китае, в Корее и Японии. В Северную Америку (США) непарный шелкопряд был непреднамеренно интродуцирован в 1869 году из Франции (Liebhold et al., 1989). В настоящее время он широко распространен в восточной части США (от Великих озер до Флориды) и в 4 провинциях на востоке Канады (Liebhold et al., 1992; Tobin, Blackburn, 2007). Область его распространения в Голарктике охватывает разнообразные природные зоны (от степей до таёжных лесов) (Гричанов и др., 2008).

Вид распространяется на большие расстояния на фазе гусеницы, но в азиатских популяциях и бабочки-самки. Новорождённые гусеницы легкие, покрыты аэрофорными волосками. Они дополнительно выпускают паутинную нить, что способствует их расселению с помощью ветра на значительные расстояния от места отрождения. Взрослые гусеницы периодически совершают массовые миграции, преодолевая расстояния до километра. Самки спо-

способны пролетать от 1-2 до 100 километров (Рожков, Васильева, 1982; Баранчиков и др., 2019). Существует также возможность образования крупных миграционных очагов в результате переноса бабочек ветром (Лямцев, 2018).

Территория фактического распространения вида – географический ареал – определяется всем комплексом биотических и абиотических факторов динамики численности его популяций. Гибель непарного шелкопряда от биотических факторов колеблется в широких пределах. Так, в Словакии птицы повреждали до 77% яйцекладок шелкопряда, а в США ими было уничтожено от 65 до 89% яиц (McManus, Csoka, 2007). Энтомопатогены в Европе гораздо более эффективно контролируют гусениц непарного шелкопряда, чем его паразитоиды (Hoch et al., 2001). Например, в Краснодарском крае до 50% гусениц гибнет от ядерного полиэдроза (Ширяева, 2011). Важным фактором смертности куколок шелкопряда как в США, так и в Европе и в Сибири оказались мелкие лесные грызуны (Smith et al., 1998; McManus, Csoka, 2007). Среди абиотических факторов важную роль играет гидрометеорологическая аномалия – засушливая погода. Она оказывает прямое и косвенное влияние на популяцию, приводит к росту плодовитости и выживаемости непарного шелкопряда, к снижению эффективности естественных врагов и уменьшению устойчивости лесных насаждений (Лямцев, 2018).

Предметом исследования в данной статье является климатический ареал непарного шелкопряда, т.е. та часть географического пространства, климатические условия которой являются необходимыми для устойчивого существования вида. А именно, с использованием климатического критерия будут охарактеризованы климатический ареал *L. dispar* в пределах территории России и его возможные изменения в XXI веке.

Методические замечания

Вид *L. dispar* весьма пластичен. Особи могут переносить как высокие, так и низкие температуры в зависимости от фазы развития. Поэтому вид способен заселять огромные территории, демонстрируя различную степень вредоносности.

В нашей стране за последние 37 лет очаги массового размножения непарного шелкопряда отмечались во всех федеральных округах в насаждениях 52 субъектов Российской Федерации. Такие очаги в лесах России наблюдаются ежегодно, но их площадь в разные годы может существенно различаться. За период 1977-2013 гг. минимальная общая площадь очагов была 155.9 тыс. га (1980 г.), максимальная – 1796 тыс. га (1978 г.). Число регионов с очагами варьировало от 14 (2011 г.) до 35 (1997 г.). От общей площади лиственных насаждений субъектов РФ общая площадь очагов может составлять от 0.01-0.2% (Владимирская обл., Республика Адыгея) до 62.4% (Тульская обл.) (Лямцев, 2018). Значительная доля лесов после повреждения непарным шелкопрядом усыхает. Приведенные цифры свидетельствуют, что задача описания ареала непарного шелкопряда и его моди-

фикации при изменении условий среды является актуальной и практически значимой.

Однако, как уже отмечалось во Введении, закономерности динамики численности популяций непарного шелкопряда пока не полностью изучены и определяются многими биотическими и абиотическими факторами. Это пока препятствует точному модельному описанию его фактического, географического ареала. Однако определенные подходы к модельному описанию его климатического ареала существуют. Они опираются на понятие «климатического предиктора». Это – гидрометеорологическая переменная или же прикладной индекс, вычисляемый с использованием нескольких таких переменных.

Для модельного описания климатического ареала вида экспертами-экологами определяется совокупность климатических предикторов и тех ограничений, которые соответствуют требованиям данного вида к климату. Климатический ареал определяется для климата значительного отрезка времени (10-30 лет) в предположении, что этот климат будет сохраняться гораздо более продолжительное время (в идеале – бесконечное время). Для рассматриваемого временного отрезка (10-30 лет), по данным системы мониторинга климата, определяется часть географического пространства, в которой значения климатических предикторов удовлетворяют требованиям вида к климату. Это и есть расчетный климатический ареал вида, соответствующий климату исходного периода времени. С течением времени климат может измениться. Соответственно изменится и расчетный климатический ареал. Такой подход к описанию климатического ареала был предложен в работе (Semenov et al., 2002) и подробно описан в монографии (Семенов и др., 2006).

В дальнейшем в статье (Семенов и др., 2020) этот подход был развит в направлении статистической оценки уверенности в том, что заданная точка географического пространства принадлежит климатическому ареалу вида. Для получения такой оценки выполнение ограничений на значения климатических предикторов проверяется не для их средних климатических значений, а для каждого года рассматриваемого периода времени. Исходя из числа лет k , для которых ограничения оказались выполненными, и продолжительности N рассматриваемого периода времени делается заключение о том, превосходит ли частота таких лет p определенное пороговое значение p_0 . Если превосходит при заданном уровне значимости, то рассматриваемая точка географического пространства принадлежит климатическому ареалу с соответствующей степенью уверенности. Значение p_0 задается экспертами-экологами, а при отсутствии информации принимается равным 0.5.

В данной работе алгоритм расчета степени уверенности был несколько модифицирован по сравнению с тем, что был использован в работе (Семенов и др., 2020). А именно, для оценки уверенности непосредственно используется вероятность того, что $\{p > p_0\}$. При этом функция $F(N, k; p)$ распределения p на отрезке $[0, 1]$ соответствует байесовскому подходу:

$$F(N, k; x) = \frac{B_x(k+1, N-k+1)}{B(k+1, N-k+1)},$$

$$B_x(a, b) = \int_0^x \theta^{(a-1)}(1-\theta)^{b-1} d\theta.$$

Здесь $B_x(a, b)$ – неполная бета-функция Эйлера. Отметим, что байесовский подход в последнее время все шире используется в климатологии для получения прикладных оценок – см., например, (Попов, Попова, 2022).

В отечественной специальной литературе имеется следующая информация относительно климата фактического, географического ареала непарного шелкопряда на территории России.

Диапазоны средних месячных значений температуры воздуха в приповерхностном слое включают в себя интервалы от +15 до +27°C для июля и от –18 до +12°C для января (Клобуков и др., 2018).

Известно также, что яйца могут выживать при температуре от –25 до –30°C, а верхний предел температуры для выживаемости имаго (бабочек) составляет +32°C (Рудых и др., 2018). Считается, что для развития особи непарного шелкопряда в течение генерации необходимо, чтобы сумма эффективных среднесуточных температур (СЭТ) за календарный год при пороге +10.4°C превышала 500°C·сут (Vanhanen et al., 2007). Используется также критерий СЭТ > 300°C·сут при температурном пороге +7°C за август-сентябрь (Рудых и др., 2018). Вид может выживать в степной зоне и не может в пустынной (Vanhanen et al., 2007).

При синтезе этой информации мы стремились к следующему:

- обеспечить соответствие нашего расчетного климатического ареала сведениям, имеющимся в специальной литературе в целом в глобальном масштабе (при этом некоторые региональные и локальные различия возможны);
- добиться этого соответствия, используя минимальное число климатических предикторов.

В соответствии с этими установками были использованы всего два критерия:

1. сумма эффективных среднесуточных температур³⁾ (СЭТ) за календарный год при пороговом значении +10.4°C должна превышать 500°C·сут;
2. средняя месячная температура воздуха в приповерхностном слое воздуха в самый теплый месяц календарного года не должна превышать +27°C (Клобуков и др., 2018).

³⁾ Сумма эффективных среднесуточных температур (СЭТ) – сумма за определенный период календарного года превышений средними суточными значениями температуры воздуха в приповерхностном слое определенного порогового значения.

Расчет глобального климатического ареала *L. dispar* для климата периода 1990-1999 гг. был выполнен с использованием этих климатических предикторов и климатических данных CRU TS v. 4.04 (Harris et al., 2020) Отдела исследования климата Университета Восточной Англии (CRU – Climatic Research Unit, University of East Anglia), см. <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>. Результаты расчета представлены на рис. 1.

Вербальные характеристики вероятности p принадлежности точки географического пространства расчетному климатическому ареалу и их цветовое воплощение на рис. 1 в целом соответствуют принятым в работе (Богданович и др., 2021): 4 – практически достоверно, $0.99 < p \leq 1.0$, темно-коричневый; 3 – весьма вероятно, $0.90 < p \leq 0.99$, коричневый; 2 – вероятно, $0.66 < p \leq 0.90$, темно-желтый; 1 – средне-вероятно, $0.33 < p \leq 0.66$, желтый. Точки категории маловероятно ($p \leq 0.33$) представлены белым цветом. Светло-серый цвет означает отсутствие данных в используемом массиве климатических данных. Такое представление результатов оценки соответствует принятому в докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата – МГЭИК (Mastrandrea et al., 2010). Мы уделили значительное внимание картографическому воплощению наших количественных оценок, поскольку этот вопрос представляется весьма важным при картографировании природных систем и их изменений (Комедчиков и др., 2012).

Сравнивая рис. 1 с рис. 2, на котором синтезирована информация о частях географического пространства, потенциально пригодных для *L. dispar* (Paini et al., 2018), можно обнаружить их удовлетворительное соответствие.

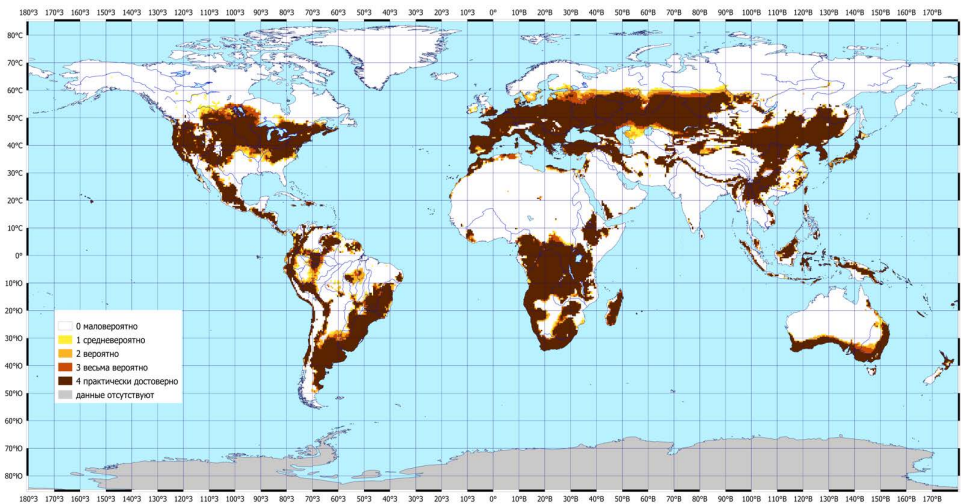


Рисунок 1. Расчетный климатический ареал *L. dispar*, соответствующий климату 1990-1999 гг.; климатические данные – CRU TS v. 4.04 (Harris et al., 2020)

Figure 1. Estimated climatic range of *L. dispar* under the climate conditions for 1990-1999; climate data – CRU TS v. 4.04 (Harris et al., 2020)

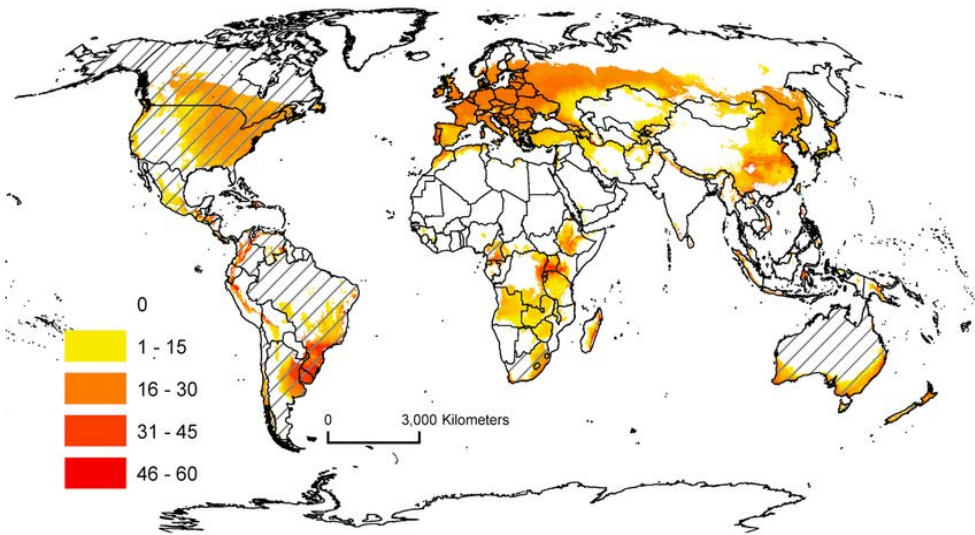


Рисунок 2. Глобальная оценка из (Paini et al., 2018) потенциальной пригодности климата для непарного шелкопряда (*L. d. asiatica* & *L. d. japonica*), полученная с помощью экоклиматического индекса (Ecoclimatic Index – EI) модели CLIMEX в легенде указаны диапазоны значений EI; страны, указанные штриховкой, обладают портами, через которые может осуществляться вселение *L. dispar* в процессе морских перевозок

Figure 2. Global assessment from (Paini et al., 2018) of potential climate suitability for the *Lymantria dispar* (*L. d. asiatica* & *L. d. japonica*) from the Ecoclimatic Index (EI) of the CLIMEX model; the legend shows the ranges of EI values; hatched countries have seaports through which *L. dispar* can be introduced

При модельном описании климатического ареала непарного шелкопряда *L. dispar* на территории России с помощью этих климатических предикторов в данной статье используется расчетный климат начального периода 1990-1999 гг. и расчетные будущие климаты 2030-2039 гг. и 2050-2059 гг. Исходные климатические данные были любезно предоставлены нам Климатическим центром Росгидромета (КЦР), функционирующим на базе Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО). Они получены в ГГО расчетом с помощью региональной климатической модели ГГО (см., например, (Школьник, Ефимов, 2015)). Эти климаты будут обозначаться КЦР. Эти данные организованы по пространственной сетке $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Для каждого элемента сетки этот массив климатических данных имеет 50 независимых реализаций для каждого из рассматриваемых десятилетних периодов времени.

Мы внесли в массивы небольшие поправки (см., (Богданович и др., 2021)), которые позволили в максимальной степени совместить расчетные данные ГГО за 1990-1999 гг. с данными наблюдений за этот период времени (CRU TS v. 4.04, см. (Harris et al., 2020)). Эти поправленные массивы данных будут обозначаться КЦР^a («a» означает «adjusted»). Принятые картографические приемы подробно описаны в работе (Семенов и др., 2020).

Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлен расчетный климатический ареал непарного шелкопряда на территории России, соответствующий климату $KЦP^a$ для периода 1990-1999 гг. Он представлен обширной областью от южных границ и вплоть до 60° с.ш. везде, кроме дальневосточной территории страны. На Дальнем Востоке в него входит территория Еврейской автономной области, юг Амурской области, Хабаровского и Забайкальского краев и Республики Бурятия, а также юг и запад Приморского края. Кроме того, в некоторых субъектах имеются небольшие фрагменты климатического ареала, например, в Республике Саха (Якутия). Подчеркнем, что это – расчетная оценка, выполненная по климатическому массиву $KЦP^a$. Фактических находок по Якутии мы в специальной литературе не обнаружили, в том числе вид не указан в подробной сводке по вредителям лесов Якутии (Аверенский, Исаев, 2013). Также можно заметить региональное расхождение на территории Республики Тыва. Наш расчет выявил только два небольших фрагмента климатического ареала (см. рис. 3), в то время как в работе (Фомин и др., 2022) указана существенно большая территория, занимаемая *L. dispar*.

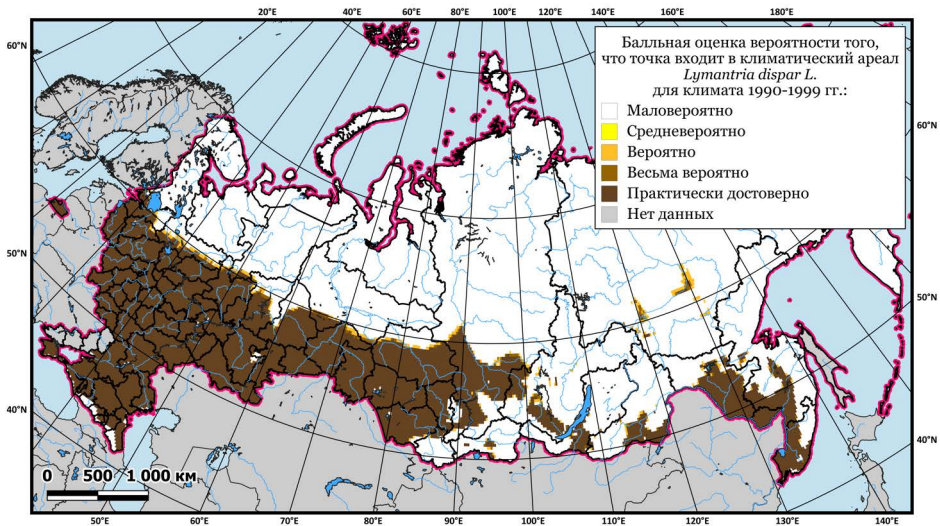


Рисунок 3. Балльная оценка вероятности того, что точка входит в климатический ареал *L. dispar* на территории России, соответствующий климату $KЦP^a$ для 1990-1999 гг.

Figure 3. The confidence scores that a point belongs to the climatic range of *L. dispar* on the territory of Russia under the $KЦP^a$ climate conditions for 1990-1999

Вероятность принадлежности точек географического пространства климатическому ареалу *L. dispar* на значительной его части характеризуется оценкой “практически достоверно”. Только на северной границе отмечаются более низкие категории вероятности. Это в значительной мере объясняется тем, что в расчетном климате $KЦP^a$ для каждого элемента сетки имеется 50

независимых реализаций климата для каждого из рассматриваемых десяти-летних периодов времени.

На рис. 4-7 показаны изменения балльной оценки вероятности того, что точка географического пространства входит в климатический ареал *L. dispar* на территории России, соответствующий климатам 2030-2039 и 2050-2059 гг., по отношению к климату, соответствующему 1990-1999 гг. Эти оценки выполнены для сценариев изменения климата RCP4.5 и RCP8.5. При этом использовались следующие словесная характеристика и цветовое воплощение изменений балльных оценок:

- увеличение: 4 – очень сильное, фиолетовый; 3 – сильное, темно-красный; 2 – среднее, красный; 1 – слабое, розовый;
- 0 – изменение не выявлено, белый;
- уменьшение: (-1) – слабое, салатовый; (-2) – среднее, светло-зеленый; (-3) – сильное, зеленый; (-4) – очень сильное, темно-зеленый.

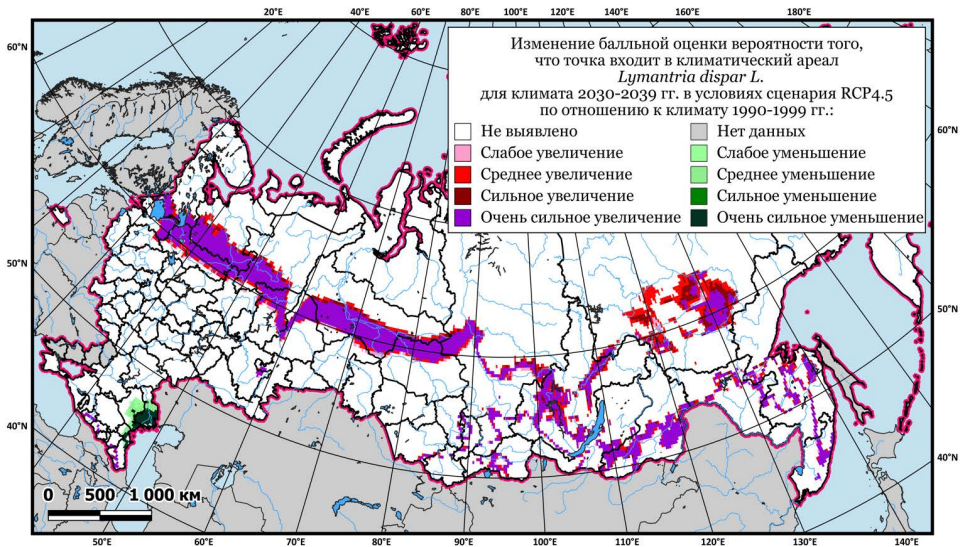


Рисунок 4. Изменение балльной оценки вероятности того, что точка географического пространства входит в климатический ареал *L. dispar*, соответствующий климату КЦР^a для 2030-2039 гг. по сравнению с климатом 1990-1999 гг. в условиях сценария RCP4.5

Figure 4. The changes in the confidence scores that a point belongs to the climatic range of *L. dispar* under the КЦР^a climate conditions for 2030-2039 as compared to the 1990-1999 climate under RCP4.5 scenario conditions

Изменение на территории России расчетного климатического ареала непарного шелкопряда, соответствующего климатам все более отдаленных периодов XXI века, в Европейской части России будет выражаться в расширении в северном направлении, а также в направлении больших высот на Северном Кавказе. В Азиатской части России расширение ожидается как в северном, так и в восточном направлениях. При этом эти изменения ожидаемо будут более выражены в условиях сценария RCP8.5, чем в условиях сценария RCP4.5.

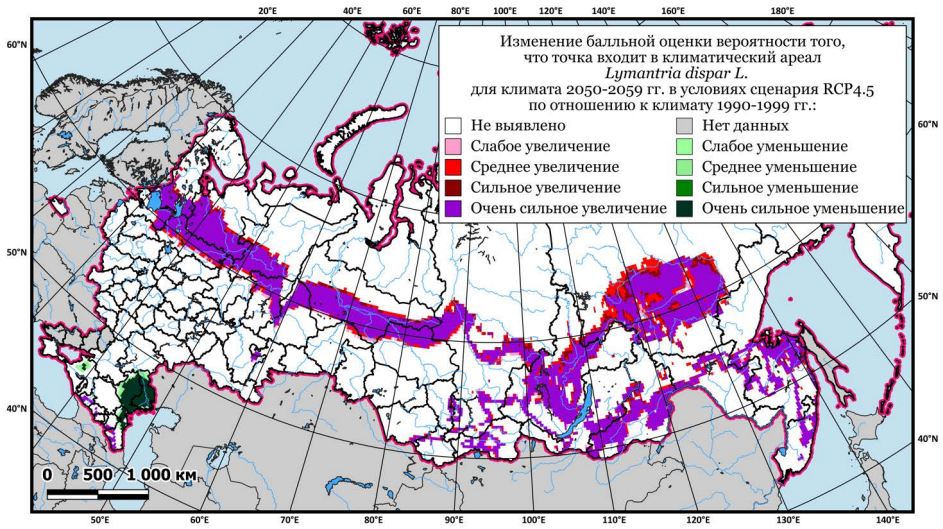


Рисунок 5. Изменение балльной оценки вероятности того, что точка географического пространства входит в климатический ареал *L. dispar*, соответствующий климату КЦР^a для 2050-2059 гг. по сравнению с климатом 1990-1999 гг. в условиях сценария RCP4.5

Figure 5. The changes in the confidence scores that a point belongs to the climatic range of *L. dispar* under the КЦР^a climate conditions for 2050-2059 as compared to the 1990-1999 climate under RCP4.5 scenario conditions

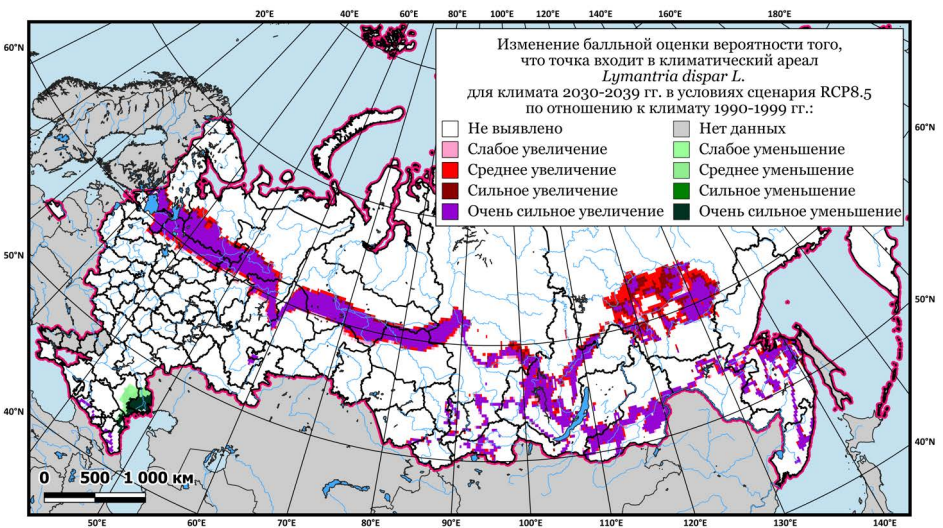


Рисунок 6. Изменение балльной оценки вероятности того, что точка географического пространства входит в климатический ареал *L. dispar*, соответствующий климату КЦР^a для 2030-2039 гг. по сравнению с климатом 1990-1999 гг. в условиях сценария RCP8.5

Figure 6. The changes in the confidence scores that a point belongs to the climatic range of *L. dispar* under the КЦР^a climate conditions for 2030-2039 as compared to the 1990-1999 climate under RCP8.5 scenario conditions

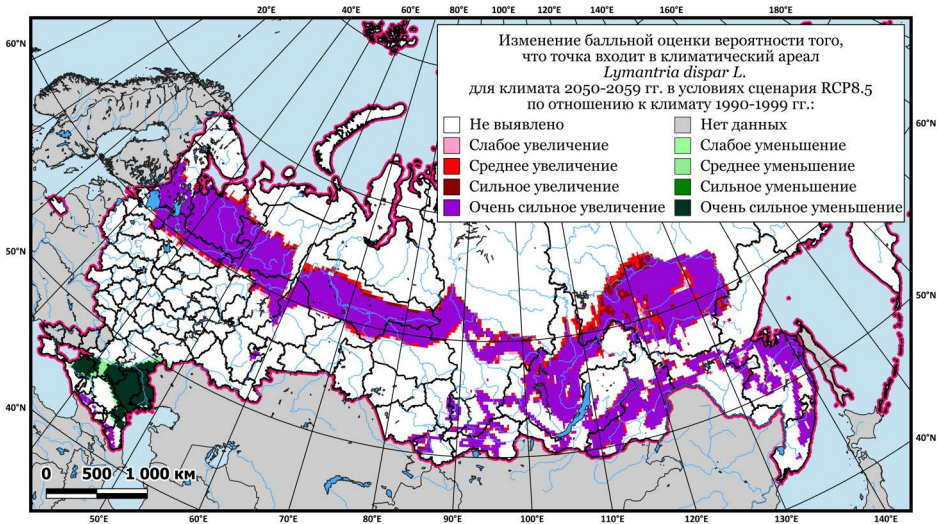


Рисунок 7. Изменение балльной оценки вероятности того, что точка географического пространства входит в климатический ареал *L. dispar*, соответствующий климату КЦР^a для 2050-2059 гг. по сравнению с климатом 1990-1999 гг. в условиях сценария RCP8.5

Figure 7. The changes in the confidence scores that a point belongs to the climatic range of *L. dispar* under the КЦР^a climate conditions for 2050-2059 as compared to the 1990-1999 climate under RCP8.5 scenario conditions

Эти оценки в целом совпадают с имеющимися в специальной литературе. Так, в работе (Ясюкевич и др., 2019) отмечается, что по отношению к базовому периоду 1981-2000 гг. в 2011-2030 гг. расширение ареала *L. dispar* произойдет в 29 субъектах РФ, а в 2080-2099 гг. – в 40. При этом тенденций к сокращению ареала в условиях рассматриваемых климатических сценариев не было выявлено.

Однако, согласно приведенным выше оценкам, климатам КЦР^a соответствует заметное сокращение климатического ареала непарного шелкопряда на юге Европейской территории России. Так, в условиях наиболее жесткого сценария RCP8.5 климату 2050-2059 гг. будет соответствовать существенное сокращение климатического ареала, которое затронет целиком Республику Калмыкия и Астраханскую область, а также часть Краснодарского и Ставропольского краев, Ростовскую и Волгоградскую области, Республики Крым, Чеченскую Республику и Республику Дагестан. Причина этого отличия в том, что в данной работе для описания климатического ареала использовались два климатических предиктора, а в работе (Ясюкевич и др., 2019) – лишь первый из них.

Отметим в заключении этого раздела, что существует ряд региональных исследований будущих изменений ареала *L. dispar*. Так, указывается, что в Бурятии северная граница ареала непарного шелкопряда может сместиться к северу на 450 км и на 150 м в горах в направлении больших высот. До послед-

него времени северная граница распространения непарного шелкопряда в Бурятии ограничивалась примерно 52° с.ш. При дальнейшем потеплении климата непарный шелкопряд может распространиться на север, или выше в горы, заняв участки, подходящие по лесорастительным и климатическим условиям (Рудых и др., 2018).

Заключение

Система мониторинга климата создана в глобальном масштабе под эгидой Всемирной метеорологической организации (ВМО). Ее российский сегмент, созданный Росгидрометом, функционирует уже не одно десятилетие и регулярно представляет данные о состоянии климата на территории России и его изменениях. Как показано в данной статье, эти данные можно использовать для оценки климатических ареалов биологических видов, в том числе имеющих хозяйственное значение. Сейчас это особенно актуально, поскольку мониторинг фактических ареалов видов на уровне страны и, тем более в глобальном масштабе, систематически пока не осуществляется (хотя некоторые научно-исследовательские проекты выполняют такие наблюдения в локальном или субрегиональном масштабах).

Более широкое применение расчетных, модельных методов к оценке климатических ареалов видов сдерживается отсутствием унифицированной методологии выбора климатических предикторов – прикладных климатических индексов, описывающих климатический ареал. Разработка такой методологии представляется приоритетной задачей для специалистов в области геоинформатики, биогеографии и экологии.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке со стороны следующих программ и проектов:

Темы «Изменения климата и их последствия для окружающей среды и жизнедеятельности населения на территории России»

Государственного задания ФГБУН «Институт географии РАН» АААА-А19-119022190173-2 (FMGE-2019-0009)";

Тема 3.1. «Развитие методов и технологий климатического обслуживания, включая совершенствование моделей прогнозирования климата, методов оценки последствий изменения климата, климатического обоснования национальных адаптационных планов и мониторинга эффективности адаптаций» государственного задания ФГБУ «ИГКЭ» № АААА-А20-120070990079-6.

Список литературы

Аверенский, А.И., Исаев, А.П. (2013) *Насекомые – главнейшие вредители лесов Якутии*, отв. ред. Н.Н. Винокуров, Новосибирск, Наука, 164 с.

Баранчиков, Ю.Н. (1987) *Трофическая специализация чешуекрылых*, Красноярск, ИЛиД СО АН СССР, 171 с.

Баранчиков, Ю.Н., Демидко, Д.А., Бабичев, Н.С., Петько, В.М., Ефременко, А.А., Вонг, Б. (2019) О дальности прямого полета самок азиатских популяций непарного шелкопряда – *Lymantria dispar* (L.) (Lepidoptera: Erebidae), *Мониторинг и биологические методы контроля вредителей и патогенов древесных растений: от теории к практике. Материалы Второй Всероссийской конференции с международным участием Москва, 22-26 апреля 2019 г.*, Ю.Н. Баранчиков (ред.), Москва-Красноярск, ИЛ СО РАН, с. 17-18.

Бахвалов, С.А., Колтунов, Е.В., Мартемьянов, В.В. (2010) *Факторы и экологические механизмы популяционной динамики лесных насекомых-филлофагов*, Новосибирск, изд-во СО РАН, 299 с.

Богданович, А.Ю., Павлова, В.Н., Ранькова, Э.Я., Семенов, С.М. (2021) Влияние изменений засушливости в России в XXI веке на пригодность территорий для возделывания зерновых культур, *Фундаментальная и прикладная климатология*, № 1, с. 20-35, doi:10.21513/2410-8758-2021-1-20-35.

Гричанов, И.Я., Овсянникова, Е.И., Саулич, М.И. (2008) Ареал и зоны вредоносности непарного шелкопряда (*Lymantria dispar* L.), *Агроэкологический атлас России и сопредельных стран: экономически значимые растения, их вредители, болезни и сорные растения*, под ред. Афонин, А.Н., Грин, С.Л., Дзюбенко, Н.И., Фролов, А.Н., электронный ресурс, URL: www.agroatlas.ru/content/pests/Ocneria_dispar/map/index.html.

Камаев, И.О., Мазурин, Е.С., Шипулин, А.В. (2015) Непарный шелкопряд (*Lymantria dispar*): выделение внутривидовых комплексов и молекулярно-генетические подходы к идентификации азиатского подвида, *Карантин растений. Наука и практика*, № 1, с. 45-52.

Киреева, И.М. (1983) *Экология и физиология непарного шелкопряда*, Киев, Наукова Думка, 128 с.

Клобуков, Г.И., Пономарёв, В.И., Напалкова, В.В. (2018) Адаптационные популяционные особенности эмбриональной стадии непарного шелкопряда *Lymantria dispar* L. (Lepidoptera: Erebidae) разного широтного происхождения, *X Чтения памяти О.А. Катаева*, Дендробионтные беспозвоночные животные и грибы и их роль в лесных экосистемах, т. 1. Насекомые и прочие беспозвоночные, материалы международной конференции. Санкт-Петербург, СПбГЛТУ, с. 48-49.

Колтунов, Е.В. (2006) *Экология непарного шелкопряда в лесах Евразии*, Екатеринбург, УрО РАН, 259 с.

Комедчиков, Н.Н., Краюхин, А.Н., Поздняк, Г.В., Кравченко, Г.Ф., Кривов, С.В., Рябчикова, В.И. (2012) Национальный атлас России, том 2" Природа. Экология" и отображение состояния окружающей среды, *Геодезия и картография*, № 5, с. 20-31.

Кондаков, Ю.П. (1963) Непарный шелкопряд (*Osneria dispar* L.) в лесах Красноярского края, *Защита лесов Сибири от насекомых-вредителей*, М., Изд-во АН СССР, с. 30-77.

Лямцев, Н.И. (2013) *Динамика численности непарного шелкопряда в лесостепных дубравах Европейской России*, ВНИИЛМ, Пушкино, 97 с.

Лямцев, Н.И. (2018) *Прогнозирование массовых размножений непарного шелкопряда, угрозы повреждения дубрав и необходимости защитных мероприятий*, ВНИИЛМ, Пушкино, 84 с.

Пономарев, В.И., Ильиных, А.В., Гниненко, Ю.И., Соколов, Г.И., Андреева, Е.М. (2012) *Непарный шелкопряд в Зауралье и Западной Сибири*, Екатеринбург, УрО РАН, 320 с.

Попов, И.О., Попова, Е.Н. (2022) Анализ изменения режима осадков на территории Российской Федерации во второй половине XX – начале XXI века с применением байесовской оценки параметров Марковской цепи, *Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле*, т. 502, № 1, с. 38-44.

Рожков, А.С., Васильева, Т.Г. (1982) Непарный шелкопряд в Восточной Сибири, *Непарный шелкопряд в Средней и Восточной Сибири*, Новосибирск, Наука, с. 4-19.

Рудых, С.Г., Филиппов, А.В., Юшань, Дуала (2018) Полувековая (1963-2017 гг.) динамика численности и распространения непарного шелкопряда (Lepidoptera, Lymantriidae) в Бурятии, *Природа Внутренней Азии*, № 4 (9), с. 44-53.

Семенов, С.М., Ясюкевич, В.В., Гельвер, Е.С. (2006) *Выявление климатогенных изменений*, М., Издательский центр «Метеорология и гидрология», 324 с.

Семенов, С.М., Попов, И.О., Ясюкевич, В.В. (2020) Статистическая модель для оценки формирования климатогенных угроз по данным мониторинга климата. *Метеорология и гидрология*, № 5, с. 59-65.

Фомин, С.Н., Баринов, В.В., Мыглан, В.С. 2022. Вспышки массового размножения непарного шелкопряда *Lymantria dispar* (L.) в Республике Тыва; история исследований. *Журн. СВУ Биология*, т. 15, № 1, с. 48-71.

Ширяева, Н.В. (2011) Биотические факторы регулирования численности основных филлофагов дубовых лесов Северного Кавказа, *Материалы конференции*, т. 17, с. 20.

Школьник, И.М., Ефимов, С.В. (2015) Региональная модель нового поколения для территории северной Евразии, *Труды ГГО*, вып. 576, с. 201-211.

Юрченко, Г.И., Турова, Г.И. (1988) *Временные рекомендации по надзору за непарным шелкопрядом на Дальнем Востоке*, Хабаровск, ДальНИИЛХ, 19 с.

Ясюкевич, В.В., Титкина, С.Н., Попов, И.О., Ясюкевич, Н.В. (2019) *Оценки региональной уязвимости лесного хозяйства субъектов Российской Федерации*

Федерации под влиянием ожидаемого в XXI веке изменения климата в отношении непарного шелкопряда и шелкопряда-монашенки (*Lymantria dispar* L. и *Lymantria monacha* L., Erebidae, Lepidoptera), *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*, т. 30, № 1-2, с. 15-32.

Aukema, J.E., Leung, B., Kovacs, K., Chivers, C., Britton, K.O., Jeffrey, Englin J., Frankel, S.J., Haight, R.G., Holmes, T.P., Liebhold, A.M., McCullough, D.G., Von Holle, B. (2011) Economic Impacts of Non-Native Forest Insects in the Continental United States, *PLoS ONE*, 6(9), e24587, doi:10.1371/journal.pone.0024587.

Baranchikov, Y.N. (1989) Ecological basis of the evolution of host relationships in Eurasian gypsy moth populations, in Wallner, W.E. and McManus, K.A. (eds.), *Proceedings, Lymantriinae: A comparison of features of New and Old World tussock moth*, USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, Broomall, PA., pp. 319-338.

Bradshaw, C.J.A., Leroy, B., Bellard, C., Roiz, D., Albert, C., Fournier, A., Barbet-Massin, M., Salles, J.M., Simard, F., Courchamp, F. (2016) Massive yet grossly underestimated global costs of invasive insects, *Nature Communications*, vol. 7, 12986, available at: <https://www.nature.com/articles/ncomms12986>.

Gray, D.R., Ravlin, F.W., Régnière, J., Logan, J.A. (1995) Further advances toward a model of gypsy moth (*Lymantria dispar* (L.)) egg phenology: Respiration rates and thermal responsiveness during diapause, and age-dependent developmental rates in postdiapause, *J. Insect Physiol.*, vol. 41, pp. 247-256.

Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P.D., Lister, D. (2020) Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset, *Scientific Data*, 7, Article number 109, available at: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3/>.

Hoch, G., Zubrik, M., Novotny, J., Schopf, A. (2001) The natural enemy complex of the gypsy moth, *Lymantria dispar* (Lep., Lymantriidae) in different phases of its population dynamics in eastern Austria and Slovakia – A comparative study, *J. Appl. Entomol.*, vol. 125, pp. 217-227.

Keena, M.A., Richards, J.Y. (2020) Comparison of Survival and Development of Gypsy Moth *Lymantria dispar* L. (Lepidoptera: Erebidae) Populations from Different Geographic Areas on North American Conifers, *Insects*, vol. 11(4), p. 260, available at: <https://doi.org/10.3390/insects11040260>.

Lancette, J. (2021) Breaking Barriers in Entomology: The Better Common Names Project, *American Entomologist*, vol. 4, pp. 10-11, doi: <https://doi.org/10.1093/ae/tmab061>.

Liebhold, A.M., Gottschalk, K.W., Muzika, R.M., Montgomery, M.E., Young, R., O'Day, K., Kelley, B. (1995) Suitability of North American tree species to the gypsy moth: A summary of field and laboratory tests, *U.S. Department of Agriculture Forest Service NE Forest Experimental Station General Technical Bulletin*, NE-211, U.S. Department of Agriculture: Washington, DC, USA, 34 p.,

available at: https://www.fs.usda.gov/ne/newtown_square/publications/technical_reports/pdfs/scanned/gtr211.pdf.

Liebhold, A.M., Mastro, V., Schaefer, P.W. (1989) Learning from the legacy of Léopold Trouvelot, *Bull. Entomol. Soc. Am.*, vol. 35, pp. 20-22.

Liebhold, A.M., Halverson, J.A., Elmes, G.A. (1992) Gypsy moth invasion in North America: A quantitative analysis, *J. Biogeogr.*, vol. 19, pp. 513-520.

Lowe, S., Brone, M., Boudjelas, S., De Poorter, M. (2000) *100 of the World's Worst Invasive Alien Species. A Selection from the Global Invasive Species Database*, Hollands Printing Ltd., Auckland, New Zealand, 12 p.

Mastrandrea, M.D., Field, C.B., Stocker, T.F., Edenhofer, O., Ebi, K.L., Frame, D.J., Held, H., Kriegler, E., Mach, K.J., Matschoss, P.R., Plattner, G.-K., Yohe, G.W., Zwiers, F.W. (2010) *Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties*, IPCC Cross-Working Group Meeting on Consistent Treatment of Uncertainties, Jasper Ridge, CA, USA 6-7 July 2010, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), available at: <http://www.ipcc.ch>.

McManus, M., Csóka, G. (2007) History and impact of gypsy moth in north America and comparison to the recent outbreaks in Europe, *Acta Silv. Lignaria Hung.*, vol. 3, pp. 47-64.

Osborne, M. (2022) Invasive insect gets a new name: spongy moth, *Smithsonian Magazine*, available at: <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/invasive-moth-gets-a-new-name-spongy-moth-180979680/>.

Paini, D.R., Mwebaze, P., Kuhnert, P.M., Kriticos, D.J. (2018) Global establishment threat from a major forest pest via international shipping: *Lymantria dispar*, *Scientific reports*, vol. 8, no. 1, pp. 1-7.

Pogue, M.C., Schaefer, P.W. (2007) *A review of selected species of Lymantria (Hubner 1819) (Lepidoptera: Noctuidae: Lymantrunae) from subtropical and temperate regions of Asia including the description of three new species, some potentially invasive to North America*, Publication FHTET-2006-2007, USDA. Forest Service, Forest Health Technology Enterprise Team, Fort Collins., Colorado, 221 p.

Semenov, S.M., Gelver, E.S., Yasyukevich, V.V. (2002) Temperature Conditions for Development of Two Species of Malaria Pathogens in the Vector Organism in Russia in the 20th Century, *Doklady Biological Sciences*, vol. 387, pp. 523-528, translated from *Doklady Akademii Nauk*, vol. 387, no. 1, 2002, pp. 131-136.

Smith, H., Elkinton, J., Wallner, W., Lunchenko, G., Baranchikov, Y. (1998) Comparison of the potential role of small mammal predators of forest pest insects in the U.S. and former Soviet Union: a study of ecological equivalents, *Euro-American Mammal Congress, Santiago de Compostela, Spain*, pp. 294-295.

Srivastava, V., Keena, M.A., Maennicke, G.E., Hamelin, R.C., Griess, V.C. (2021) Potential Differences and Methods of Determining Gypsy Moth Female Flight Capabilities: Implications for the Establishment and Spread in Novel Habitats, *Forests*, vol. 12, p. 103, available at: <https://doi.org/10.3390/f12010103>.

Tobin, P., Blackburn, L.M. (2007) *Slow the Spread: A National Program to Manage the Gypsy Moth. General Technical Reports NRS-6*, USDA, Forest Service, Northern Research Station: Newton Square, PA, USA, 109 p.

Vanhanen, H., Veteli, T.O., Paivinen, S., Kellomaki, S., Niemela, P. (2007) Climate change and range shifts in two insect defoliators: gypsy moth and nun moth—a model study, *Silva Fennica*, vol. 41, no. 4, pp. 621-638.

References

Averenskij, A.I., Isaev, A.P. 2013. *Nasekomye – glavnejshie vrediteli lesov Yakutii* [Insects are the main pests of the forests of Yakutia], in N.N. Vinokurov (ed.), Nauka, Novosibirsk, Russia, 164 p.

Baranchikov, Yu.N. (1987) *Troficheskaya specializaciya cheshuekrylyh* [Trophic specialization of Lepidoptera.], ILiD SO AN USSR, Krasnoyarsk, 171 p.

Baranchikov, Yu.N., Demidko, D.A., Babichev, N.S., Pet'ko, V.M., Efremenko, A.A., Vong, B. (2019) O dal'nosti pryamogo poleta samok aziatskih populyacij neparnogo shelkopryada – *Lymantria dispar* (L.) (Lepidoptea: Erebidae) [On the range of direct flight of females of Asian populations of the *Lymantria dispar* (L.) (Lepidoptea: Erebidae)], *Monitoring i biologicheskie metody kontrolya vreditel'ej i patogenov drevesnyh rastenij: ot teorii k praktike. Materialy Vtoroj Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem Moskva, 22-26 aprelya 2019 g.* [Monitoring and biological control methods for pests and pathogens of woody plants: from theory to practice. Materials of the Second All-Russian Conference with international participation Moscow, April 22-26, 2019], in Yu.N. Baranchikov (ed.), Moscow-Krasnoyarsk, Russia, pp. 17-18.

Bahvalov, S.A., Koltunov, E.V., Martem'yanov, V.V. (2010) *Faktory i ekologicheskie mekhanizmy populyacionnoj dinamiki lesnyh nasekomyh-fillofagov* [Factors and ecological mechanisms of population dynamics of forest phyllophagous insects], Novosibirsk, Russia, 299 p.

Bogdanovich, A.Yu., Pavlova, V.N., Ran'kova, E.Ya., Semenov S.M. (2021) Vliyanie izmenenij zasushlivosti v Rossii v XXI veke na prigodnost' territorij dlya vozdelevaniya zernovyh kul'tur [Influence of changes in aridity in Russia in the 21st century on the suitability of territories for the cultivation of grain crops], *Fundamental and applied climatology*, no. 1, pp. 20-35, doi:10.21513/2410-8758-2021-1-20-35.

Grichanov, I.Ya., Ovsyannikova, E.I., Saulich, M.I. (2008) Areal i zony vredonosnosti neparnogo shelkopryada (*Lymantria dispar* L.) [The area and zones

of damage of the *Lymantria dispar* L.] *Agroekologicheskij atlas Rossii i sopredel'nyh stran: ekonomicheski znachimye rasteniya, ih vrediteli, bolezni i sornye rasteniya* [Agroecological atlas of Russia and neighboring countries: economically significant plants, their pests, diseases and weeds], in Afonin, A.N., Grin, S.L., Dzyubenko, N.I., Frolov, A.N. (eds.), available at: http://www.agroatlas.ru/ru/content/pests/Ocneria_dispar/map/index.html.

Kamaev, I.O., Mazurin, E.S., Shipulin, A.V. (2015) *Neparnyj shelkopryad (Lymantria dispar): vydelenie vnutrividovyh kompleksov i molekulyarno-geneticheskie podhody k identifikacii aziatskogo podvida* [Lymantria dispar: identification of intraspecific complexes and molecular genetic approaches to the identification of the Asian subspecies], *Karantin rastenij. Nauka i praktika*, no. 1, pp. 45-52.

Kireeva, I.M. (1983) *Ekologiya i fiziologiya neparnogo shelkopryada* [Ecology and physiology of the Lymantria dispar], Naukova Dumka, Kiev, 128 p.

Klobukov, G.I., Ponomaryov, V.I., Napalkova, V.V. (2018) *Adaptacionnye populyacionnye osobennosti embrional'noj stadii neparnogo shelkopryada Lymantria dispar L. (Lepidoptera: Erebidae) raznogo shirotnogo proiskhozhdeniya* [Adaptation population features of the embryonic stage of the Lymantria dispar L. (Lepidoptera: Erebidae) of different latitudinal origin], *X Chteniya pamyati OA Kataeva* [X Readings in memory of OA Kataev], *Dendrobiontnye bespozvonochnye zhivotnye i griby i ih rol' v lesnyh ekosistemah. T. 1. Nasekomye i prochie bespozvonochnye, materialy mezhdunarodnoj konferencii* [X Readings in memory of O.A. Kataev. Dendrobiont invertebrates and fungi and their role in forest ecosystems. V. 1. Insects and other invertebrates, materials of the international conference.]. St. Petersburg, SPbGLTU, pp. 48-49.

Koltunov, E.V. (2006) *Ekologiya neparnogo shelkopryada v lesah Evrazii* [Ecology of the Lymantria dispar in the forests of Eurasia], UrO RAN, Ekaterinburg, Russia, 259 p.

Komedchikov, N.N., Krayuhin, A.N., Pozdnyak, G.V., Kravchenko, G.F., Krivov, S.V., Ryabchikova, V.I. (2012) *Nacional'nyj atlas Rossii, Tom 2" Priroda, Ekologiya" i otobrazhenie sostoyaniya okruzhayushchej sredy* [National Atlas of Russia, Volume 2 "Nature, Ecology" and displaying the state of the environment], *Geodeziya i kartografiya*, no. 5, pp. 20-31.

Kondakov, Yu.P. (1963) *Neparnyj shelkopryad (Ocneria dispar L.) v lesah Krasnoyarskogo kraja* [*Ocneria dispar* L. in the forests of the Krasnoyarsk Territory], *Zashchita lesov Sibiri ot nasekomyh-vreditel'ej* [Protection of forests of Siberia from pests], Izd-vo AN SSSR, Moscow, Russia, pp. 30-77.

Lyamcev, N.I. (2013) *Dinamika chislennosti neparnogo shelkopryada v lesostepnyh dubravah Evropejskoj Rossii* [Population dynamics of the Lymantria dispar in the forest-steppe oak forests of European Russia], VNIILM, Pushkino, Russia, 97 p.

Lyamcev, N.I. (2018) *Prognozirovanie massovykh razmnozhenij neparnogo shelkopryada, ugrozy povrezhdeniya dubrav i neobходимosti zashchitnykh meropriyatij* [Prediction of mass reproductions of the *Lymantria dispar*, the threat of damage to oak forests and the need for protective measures], VNIILM, Pushkino, Russia, 84 p.

Ponomarev, V.I., Il'inyh, A.V., Gninenko, Yu.I., Sokolov, G.I., Andreeva, E.M. (2012) *Neparnyj shelkopryad v Zaural'e i Zapadnoj Sibiri* [*Lymantria dispar* in the Trans-Urals and Western Siberia.], UrO RAN, Ekaterinburg, Russia, 320 p.

Popov, I.O., Popova, E.N. (2022) Analiz izmeneniya rezhima osadkov na territorii Rossijskoj Federacii vo vtoroj polovine XX – nachale XXI veka s primeneniem bajesovskoj ocenki parametrov Markovskoj cepi [Analysis of changes in the precipitation regime on the territory of the Russian Federation in the second half of the 20th – early 21st century using the Bayesian estimation of the parameters of the Markov chain], *Doklady Rossijskoj Akademii nauk. Nauki o Zemle*, vol. 502, no. 1, pp. 38-44.

Rozhkov, A.S., Vasil'eva, T.G. (1982) *Neparnyj shelkopryad v Vostochnoj Sibiri* [*Lymantria dispar* in Eastern Siberia], *Neparnyj shelkopryad v Srednej i Vostochnoj Sibiri* [*Lymantria dispar* in Central and Eastern Siberia], Nauka, Novosibirsk, Russia, pp. 4-19.

Rudyh, S.G., Filippov, A.V., Yushan', Duala (2018) Poluvekovaya (1963-2017 gg.) dinamika chislennosti i rasprostraneniya neparnogo shelkopryada (Lepidoptera, Lymantriidae) v Buryatii [Half a century (1963-2017) dynamics of the abundance and distribution of the gypsy moth (Lepidoptera, Lymantriidae) in Buryatia.], *Priroda Vnutrennej Azii*, no. 4(9), pp. 44-53.

Semenov, S.M., Yasyukevich, V.V., Gel'ver, E.S. (2006) *Vyyavlenie klimatogennykh izmenenij* [Identification of climate change], Publishing Center "Meteorology and Hydrology", Moscow, Russia, 324 p.

Semenov, S.M., Popov, I.O., Yasyukevich, V.V. (2020) Statisticheskaya model' dlya ocenki formirovaniya klimatogennykh ugroz po dannym monitoringa klimata [Statistical model for assessing the formation of climatogenic threats according to climate monitoring data], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 5. pp. 59-65.

Fomin, S.N., Barinov, V.V., Myglan, V.S. (2022) Vspyshki massovogo razmnozheniya neparnogo shelkopryada *Lymantria dispar* (L.) v Respublike Tyva; istoriya issledovanij [Outbreaks of mass reproduction of the gypsy moth *Lymantria dispar* (L.) in the Republic of Tyva; research history], *Zhurn. SFU Biologiya*, vol. 15, no. 1, pp. 48-71.

Shiryayeva, N.V. (2011) Bioticheskie faktory regulirovaniya chislennosti osnovnykh fillofagov dubovykh lesov Severnogo Kavkaza [Biotic factors regulating the abundance of the main phyllophagous oak forests of the North Caucasus], *Materialy konferencii*, vol. 17, p. 20.

Shkol'nik, I.M., Efimov, S.V. (2015) Regional'naya model' novogo pokoleniya dlya territorii severnoj Evrazii [Regional model of a new generation for the territory of northern Eurasia], *Trudy GGO*, vol. 576, pp. 201-211.

Yurchenko, G.I., Turova, G.I. (1988) *Vremennye rekomendacii po nadzoru za neparnym shelkopryadom na Dal'nem Vostoke* [Temporary recommendations for the surveillance of the gypsy moth in the Far East], Dal'NIILH, Habarovsk, Russia, 19 p.

Yasyukevich, V.V., Titkina, S.N., Popov, I.O., Yasyukevich, N.V. (2019) Ocenki regional'noj uyazvimosti lesnogo hozyajstva sub"ektov Rossijskoj Federacii pod vliyaniem ozhidaemogo v XXI veke izmeneniya klimata v otnoshenii neparnogo shelkopryada i shelkopryada-monashenki (*Lymantria dispar* L. i *Lymantria monacha* L., Erebidae, Lepidoptera) [Assessments of the regional vulnerability of forestry in the constituent entities of the Russian Federation under the influence of climate change expected in the 21st century in relation to the gypsy moth and the nun moth (*Lymantria dispar* L. and *Lymantria monacha* L., Erebidae, Lepidoptera)], *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, vol. 30, no. 1-2, pp. 15-32.

Aukema, J.E., Leung, B., Kovacs, K., Chivers, C., Britton, K.O., Jeffrey, Englin J., Frankel, S.J., Haight, R.G., Holmes, T.P., Liebhold, A.M., McCullough, D.G., Von Holle, B. (2011) Economic Impacts of Non-Native Forest Insects in the Continental United States, *PLoS ONE*, 6(9), e24587, doi:10.1371/journal.pone.0024587.

Baranchikov, Y.N. (1989) Ecological basis of the evolution of host relationships in Eurasian gypsy moth populations, in Wallner, W.E. and McManus, K.A. (eds.), *Proceedings, Lymantriinae: A comparison of features of New and Old World tussock moth*, USDA Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, Broomall, PA., pp. 319-338.

Bradshaw, C.J.A., Leroy, B., Bellard, C., Roiz, D., Albert, C., Fournier, A., Barbet-Massin, M., Salles, J.M., Simard, F., Courchamp, F. (2016) Massive yet grossly underestimated global costs of invasive insects, *Nature Communications*, vol. 7, 12986, available at: <https://www.nature.com/articles/ncomms12986>.

Gray, D.R., Ravlin, F.W., Régnière, J., Logan, J.A. (1995) Further advances toward a model of gypsy moth (*Lymantria dispar* (L.)) egg phenology: Respiration rates and thermal responsiveness during diapause, and age-dependent developmental rates in postdiapause, *J. Insect Physiol.*, vol. 41, pp. 247-256.

Harris, I., Osborn, T.J., Jones, P.D., Lister, D. (2020) Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset, *Scientific Data*, 7, Article number 109, available at: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3/>.

Hoch, G., Zubrik, M., Novotny, J., Schopf, A. (2001) The natural enemy complex of the gypsy moth, *Lymantria dispar* (Lep., Lymantriidae) in different phases of its population dynamics in eastern Austria and Slovakia – A comparative study, *J. Appl. Entomol.*, vol. 125, pp. 217-227.

Keena, M.A., Richards, J.Y. (2020) Comparison of Survival and Development of Gypsy Moth *Lymantria dispar* L. (Lepidoptera: Erebidae) Populations from Different Geographic Areas on North American Conifers, *Insects*, vol. 11(4), p. 260, available at: <https://doi.org/10.3390/insects11040260>.

Lancette, J. (2021) Breaking Barriers in Entomology: The Better Common Names Project, *American Entomologist*, vol. 4, pp. 10-11, doi: <https://doi.org/10.1093/ae/tmab061>.

Liebhold, A.M., Gottschalk, K.W., Muzika, R.M., Montgomery, M.E., Young, R., O'Day, K., Kelley, B. (1995) Suitability of North American tree species to the gypsy moth: A summary of field and laboratory tests, *U.S. Department of Agriculture Forest Service NE Forest Experimental Station General Technical Bulletin*, NE-211, U.S. Department of Agriculture: Washington, DC, USA, 34 p., available at: https://www.fs.usda.gov/ne/newtown_square/publications/technical_reports/pdfs/scanned/gtr211.pdf.

Liebhold, A.M., Mastro, V., Schaefer, P.W. (1989) Learning from the legacy of Léopold Trouvelot, *Bull. Entomol. Soc. Am.*, vol. 35, pp. 20-22.

Liebhold, A.M., Halverson, J.A., Elmes, G.A. (1992) Gypsy moth invasion in North America: A quantitative analysis, *J. Biogeogr.*, vol. 19, pp. 513-520.

Lowe, S., Brone, M., Boudjelas, S., De Poorter, M. (2000) *100 of the World's Worst Invasive Alien Species. A Selection from the Global Invasive Species Database*, Hollands Printing Ltd., Auckland, New Zealand, 12 p.

Mastrandrea, M.D., Field, C.B., Stocker, T.F., Edenhofer, O., Ebi, K.L., Frame, D.J., Held, H., Kriegler, E., Mach, K.J., Matschoss, P.R., Plattner, G.-K., Yohe, G.W., Zwiers, F.W. (2010) *Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties*, IPCC Cross-Working Group Meeting on Consistent Treatment of Uncertainties, Jasper Ridge, CA, USA 6-7 July 2010, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), available at: <http://www.ipcc.ch>.

McManus, M., Csóka, G. (2007) History and impact of gypsy moth in north America and comparison to the recent outbreaks in Europe, *Acta Silv. Lignaria Hung.*, vol. 3, pp. 47-64.

Osborne, M. (2022) Invasive insect gets a new name: spongy moth, *Smithsonian Magazine*, available at: <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/invasive-moth-gets-a-new-name-spongy-moth-180979680/>.

Paini, D.R., Mwebaze, P., Kuhnert, P.M., Kriticos, D.J. (2018) Global establishment threat from a major forest pest via international shipping: *Lymantria dispar*, *Scientific reports*, vol. 8, no. 1, pp. 1-7.

Pogue, M.C., Schaefer, P.W. (2007) *A review of selected species of Lymantria (Hubner 1819) (Lepidoptera: Noctuidae: Lymantrinae) from subtropical and temperate regions of Asia including the description of three new species, some*

potentially invasive to North America, Publication FHTET-2006-2007, USDA, Forest Service, Forest Health Technology Enterprise Team, Fort Collins., Colorado, 221 p.

Semenov, S.M., Gelver, E.S., Yasyukevich, V.V. (2002) Temperature Conditions for Development of Two Species of Malaria Pathogens in the Vector Organism in Russia in the 20th Century, *Doklady Biological Sciences*, vol. 387, pp. 523-528, translated from *Doklady Akademii Nauk*, vol. 387, no. 1, 2002, pp. 131-136.

Smith, H., Elkinton, J., Wallner, W., Lunchenko, G., Baranchikov, Y. (1998) Comparison of the potential role of small mammal predators of forest pest insects in the U.S. and former Soviet Union: a study of ecological equivalents, *Euro-American Mammal Congress, Santiago de Compostela, Spain*, pp. 294-295.

Srivastava, V., Keena, M.A., Maennicke, G.E., Hamelin, R.C., Griess, V.C. (2021) Potential Differences and Methods of Determining Gypsy Moth Female Flight Capabilities: Implications for the Establishment and Spread in Novel Habitats, *Forests*, vol. 12, p. 103, available at: <https://doi.org/10.3390/f12010103>.

Tobin, P., Blackburn, L.M. (2007) *Slow the Spread: A National Program to Manage the Gypsy Moth. General Technical Reports NRS-6*, USDA, Forest Service, Northern Research Station: Newton Square, PA, USA, 109 p.

Vanhanen, H., Veteli, T.O., Paivinen, S., Kellomaki, S., Niemela, P. (2007) Climate change and range shifts in two insect defoliators: gypsy moth and nun moth—a model study, *Silva Fennica*, vol. 41, no. 4, pp. 621-638.

Статья поступила в редакцию (Received): 08.02.2023.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 20.02.2023.

Принята к публикации (Accepted): 24.02.2023.

Для цитирования / For citation:

Богданович, А.Ю., Добролюбов, Н.Ю., Крыленко, С.В., Баранчиков, Ю.Н., Липка, О.Н., Семенов, С.М. (2023) Климатический ареал непарного шелкопряда на территории России, соответствующий климатам конца XX века и XXI века, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 1, с. 65-88, doi:10.21513/2410-8758-2023-1-65-88.

Bogdanovich, A.Yu., Dobrolyubov, N.Yu., Krylenko, S.V., Baranchikov, Yu.N., Lipka, O.N., Semenov, S.M. (2023) Climatic range of spongy moth in Russia corresponding to climates of the late 20th century and the 21st century, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 1, pp. 65-88, doi:10.21513/2410-8758-2023-1-65-88.

**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

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

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).

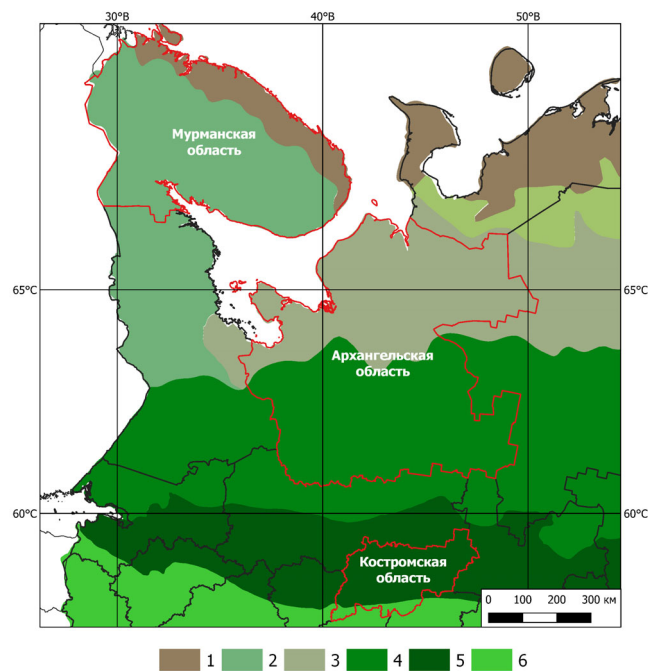


Рисунок 1. Биомы рассматриваемых субъектов РФ (красный контур), где 1 – Кольско-Большеземельско-Тазовский тундровый биом, 2 – Кольско-Карельский гипоарктическо-таежный биом, 3 – Мезено-Печорский северотаежный биом, 4 – Ладожско-Вычегодский и Приуральский среднетаежные биомы, 5 – Ладожско-Вычегодский 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 ²	144902	330103	60211
Облесенная площадь, км ²	51259	217468	43493
Доля облесенной площади	0.35	0.66	0.72
Число пород деревьев	5	11	13
Удельный запас, м ³ га ⁻¹	44.0	118.0	161.1
Биомасса древостоя, кг С м ⁻²	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

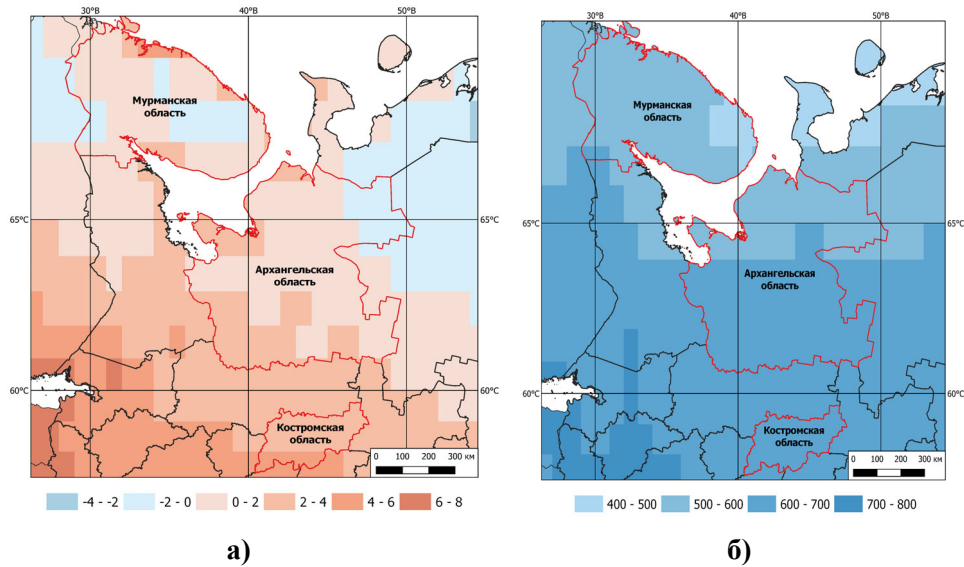


Рисунок 2. а – T, среднегодовые температуры воздуха (°C); б – P, годовые осадки (мм год⁻¹) для временного интервала s2 (2020 г.) на Северо-Западе ЕТР (по Катцов, Говоркова, 2013)

Figure 2. а – T, average annual air temperatures (°C); б – P, annual precipitation (mm year⁻¹) for the time interval s2 (2020) in the North-West of European Russia (according to Katcov, Govorkova, 2013)

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

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

где:

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

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

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 CO₂, так как в рамках данной модели мультипликативное включение зависимости NPP-miami (CO₂) 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.

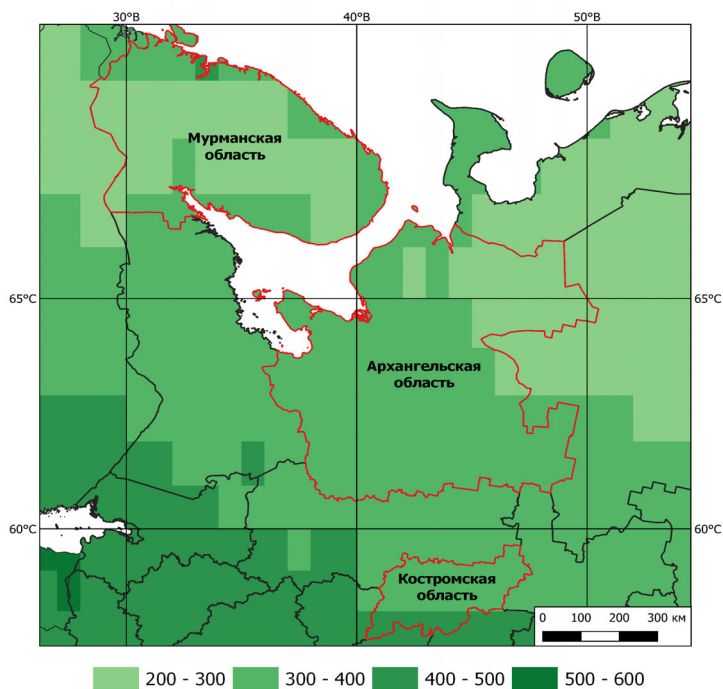


Рисунок 3. NPP Северо-Запада ЕТР на основе расчетов по модели Miami для временного интервала s2 (2020 г.), $\text{г С м}^{-2} \text{год}^{-1}$

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

Таблица 3. Типичные текущие значения NPP для бореальной зоны

Table 3. Typical NPP values for the boreal zone

NPP, $\text{г С м}^{-2} \text{год}^{-1}$	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 60-70°N
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).

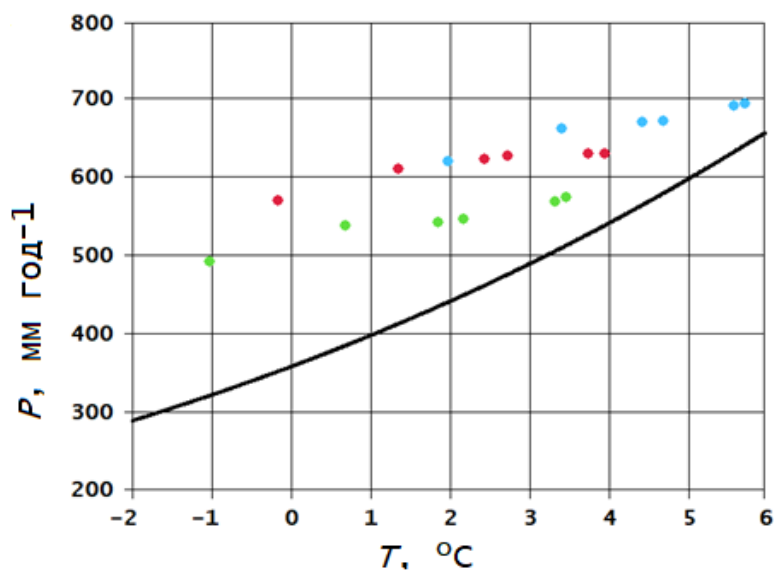


Рисунок 4. Критическая кривая (5), разделяющая области лимитирования NPP температурой (выше кривой) и осадками (ниже нее)
 Точки соответствуют значениям (T, P) для трех регионов: ● Мурманская область, ● Архангельская область, ● Костромская область (взяты из табл. 2)

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)

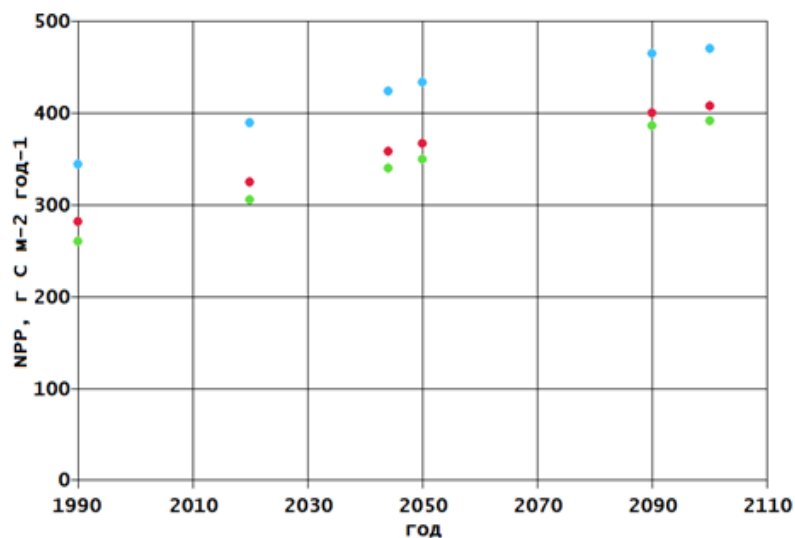


Рисунок 5. Динамика $NPP(t)$, найденная по модели Мiами при (T, P) , взятых из табл. 2.
 Точки соответствуют значениям (T, P) для трех регионов: ● Мурманская область, ● Архангельская область, ● Костромская область

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

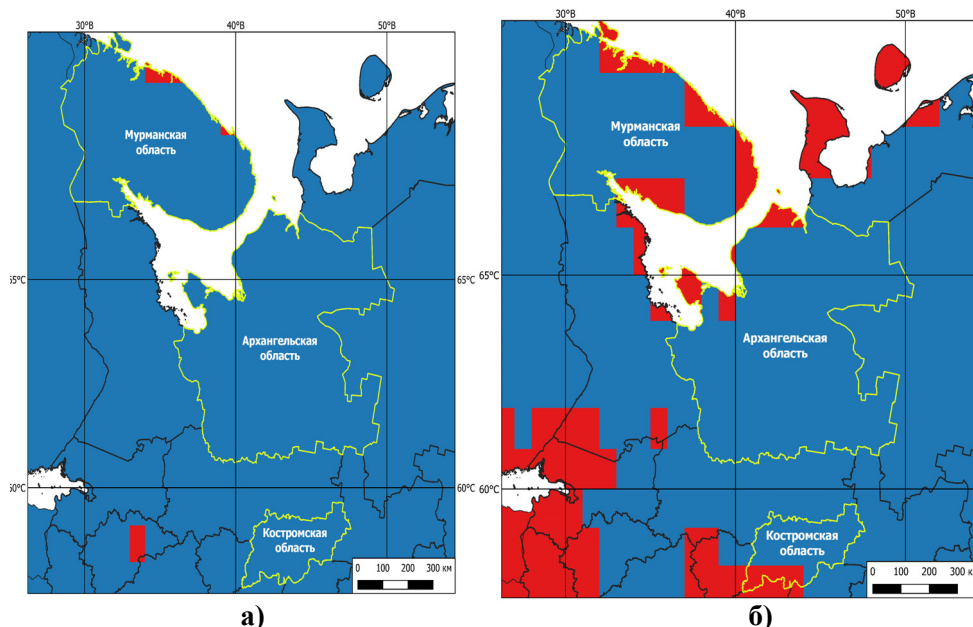


Рисунок 6. Области лимитирования (T, P) для РФ и ближайших стран, найденные по модели Miami

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 CO_2 . Модель Miami в стандартном варианте CO_2 явно не содержит, однако, если принять, что рост 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 CO₂ 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 CO₂ assimilation in leaves of C₃ 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 CO₂, *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., Hutya, 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 CO₂-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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ assimilation in leaves of C3 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 CO₂, *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 CO₂-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 CO₂ 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.