

## ОЦЕНКИ ОТКЛИКА ПРОДУКТИВНОСТИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ СЕВЕРНЫХ ЭКОСИСТЕМ РОССИИ НА ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

*Л.Л. Голубятников*

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва  
golub@ifaran.ru

**Аннотация.** На основе модельного подхода получены оценки возможных изменений величин первичной биологической продукции растительного покрова северных экосистем России при изменении климата в XXI веке. Для оценки отклика продуктивности растительного покрова на прогнозируемые в XXI в. климатические изменения использованы результаты расчетов параметров климата по климатической модели MPI-ESM1-2-LR (Институт метеорологии Макса Планка, Германия). В качестве сценариев потенциальных климатических изменений выбраны два сценария SSP1-2.6 (умеренный сценарий) и SSP5-8.5 (агрессивный сценарий). Для расчета отклика продуктивности растительности исследуемых экосистем на климатические изменения использована модель, разработанная в Лаборатории математической экологии Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. В этой модели первичная биологическая продукция растительного покрова представлена в виде непрерывной, однозначно определенной функции от значений радиационного баланса и суммарного испарения. Модельные расчеты позволили выявить пространственные тенденции и масштабы вероятных изменений продуктивности растительного покрова северных экосистем России. Выявлены территории северных регионов России, на которых возможны наиболее значительные изменения величины первичной биологической продукции, по сравнению с данными наблюдений второй половины XX века.

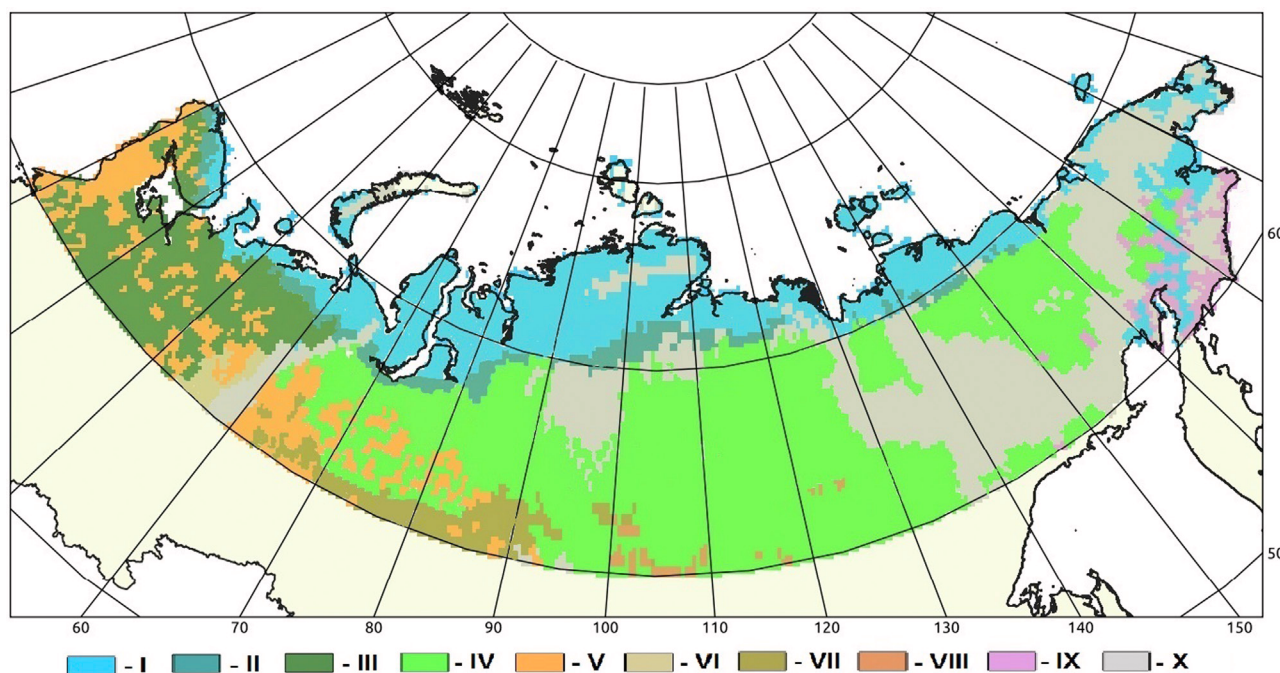
**Ключевые слова:** тундровые и таежные экосистемы, первичная биологическая продукция, климатические сценарии, депонирование атмосферного углерода.

Экосистемы субарктических и таежных территорий оказывают существенное влияние на содержание углекислого газа в атмосфере, вносят определяющий вклад в углеродный газообмен между наземными экосистемами и атмосферой в Северной Евразии [1]. Количественным показателем интенсивности депонирования атмосферного углерода растительными сообществами является их первичная биологическая продукция. Величина первичной биологической продукции (продуктивности) определяется количеством органического вещества, накапливающимся за определенный интервал времени (обычно это год) на единице площади в наземной и подземной частях растительного сообщества [2].

Данная работа посвящена анализу отклика первичной биологической продукции растительного покрова северных экосистем равнинных территорий России на ожидаемые в XXI в. климатические изменения. Получены оценки возможных изменений значений изучаемой характеристики растительности рассматриваемых экосистем при вероятных изменениях климата. В данной работе рассматриваются экосистемы расположенные на равнинных территориях России севернее 60° с.ш.

(рис. 1). На изучаемой территории, площадь которой составляет ~9,3 млн км<sup>2</sup>, расположены тундровые, лесотундровые экосистемы, экосистемы еловых, лиственничных, сосновых, елово-кедровых, елово-кедрово-пихтовых, лиственнично-сосновых лесов, зарослей кедрового стланика.

Для оценки отклика продуктивности растительного покрова на прогнозируемые в XXI в. климатические изменения использованы результаты расчетов параметров климата по климатической модели MPI-ESM1-2-LR, разработанной в Институте метеорологии Макса Планка (Германия) [3]. Эта модель участвует в международном проекте по сравнению климатических моделей CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project, Phase 6 [4]) международной программы по изучению климата WCRP (World Climate Research Programme). В качестве сценариев потенциальных изменений климата для получения модельных оценок изменений значений первичной биологической продукции в северных экосистемах России выбраны сценарии SSP1-2.6 и SSP5-8.5. Эти сценарии используются в проекте CMIP6 и описаны в работе [5]: цифра после аббревиатуры SSP (Shared Socioeconomic Pathway) означает



**Рис. 1.** Картограмма расположения северных экосистем России. Типы экосистем: I – тундровые, II – лесотундровые, III – еловые леса, IV – лиственничные леса, V – сосновые леса, VI – елово-кедровые леса, VII – елово-кедрово-пихтовые леса, VIII – лиственнично-сосновые леса, IX – заросли кедрового стланика, X – горные территории

номер пути развития человечества, число после тире – величину, на которую радиационный форсинг ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) увеличится к 2100 г. по сравнению с доиндустриальным уровнем. Сценарий SSP1-2.7 предполагает высокие темпы роста мировой экономики, снижение энергоёмкой и ресурсоёмкой сельскохозяйственной продукции, усиление контроля загрязнения воздуха. Этот сценарий является достаточно умеренным и подразумевает быстрое принятие мер, резко ограничивающих антропогенную эмиссию парниковых газов. При этом сценарии эмиссии парниковых газов достигают максимума в первой четверти XXI в. и после этого значительно уменьшаются к концу столетия. Средняя глобальная температура к концу века согласно этому сценарию повысится на  $0,8^\circ\text{C}$  по сравнению с началом века. Сценарий SSP5-8.5 предполагает выравнивание уровня экономического развития между странами, высокие темпы роста мировой экономики, основанные на использовании ископаемого топлива и изменении землепользования, ослабление контроля за антропогенными выбросами парниковых газов. Сценарий SSP5-8.5 является наиболее агрессивным и подразумевает быстрые изменения климата.

При этом сценарии эмиссии парниковых газов достигают максимума в период с 2060 по 2085 г. и немного уменьшаются к концу XXI в. Средняя глобальная температура к концу века, согласно этому сценарию, повысится на  $3,9^\circ\text{C}$  по сравнению с началом века.

Согласно климатической модели MPI-ESM1-2-LR пространственное изменение климатических характеристик на изучаемой территории России при рассматриваемых сценариях потепления весьма неоднородно. По сценарию SSP1-2.6 к концу XXI в. практически на всей изучаемой территории изменение среднегодовой температуры воздуха составит от  $-0,5^\circ\text{C}$  до  $+0,5^\circ\text{C}$  по сравнению с началом века. Только на территориях Кольского, Чукотского полуостровов, Карелии, долины реки Анадырь, Корякского нагорья и северного побережья Охотского моря ожидается повышение среднегодовой температуры воздуха от  $0,5^\circ\text{C}$  до  $1,0^\circ\text{C}$  по сравнению с началом века. По сценарию SSP5-8.5 среднегодовая температура воздуха на большей части рассматриваемой территории России может увеличиться на  $5-8^\circ\text{C}$  по сравнению с началом XXI в. На полуострове Таймыр вероятно более значительное повышение температуры воздуха (более

чем на 8 °С), на территории юго-западных районов рассматриваемой части России прогнозируется повышение температуры воздуха на 4–5 °С.

Оценки изменения количества годовых осадков существенно отличаются. По сценарию SSP1-2.6, к концу XXI в. на изучаемой территории Европейской России, Западной и Средней Сибири изменение количества осадков составит от уменьшения до 30 мм/год до увеличения не более чем на 120 мм/год по сравнению с началом века. На изучаемой территории северо-востока Сибири вероятно повышение количества осадков на 30–120 мм/год. Согласно сценарию SSP5-8.5, количество осадков практически на всей рассматриваемой территории России может возрасти на 60–200 мм/год по сравнению с началом XXI в. В ряде районов изучаемой территории Сибири вероятно увеличение осадков более чем на 200 мм/год.

Ряд исследователей полагают, что ожидаемые повышение приземной температуры воздуха и изменения осадков могут привести к серьезным изменениям в структуре, видовом составе, сезонной динамике и пространственном распределении растительных сообществ.

Для определения отклика первичной биологической продукции северных экосистем России на климатические изменения использовалась модель, разработанная в Лаборатории математической экологии Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН [2; 6]. Основой этой модели является биоклиматическая схема, в которой первичная биологическая продукция растительного покрова представлена в виде непрерывной, однозначно определенной функции от значений радиационного баланса и суммарного испарения. В данной работе использованы результаты экспериментальных исследований первичной биологической продукции тундровых и лесных фитоценозов России [7–9].

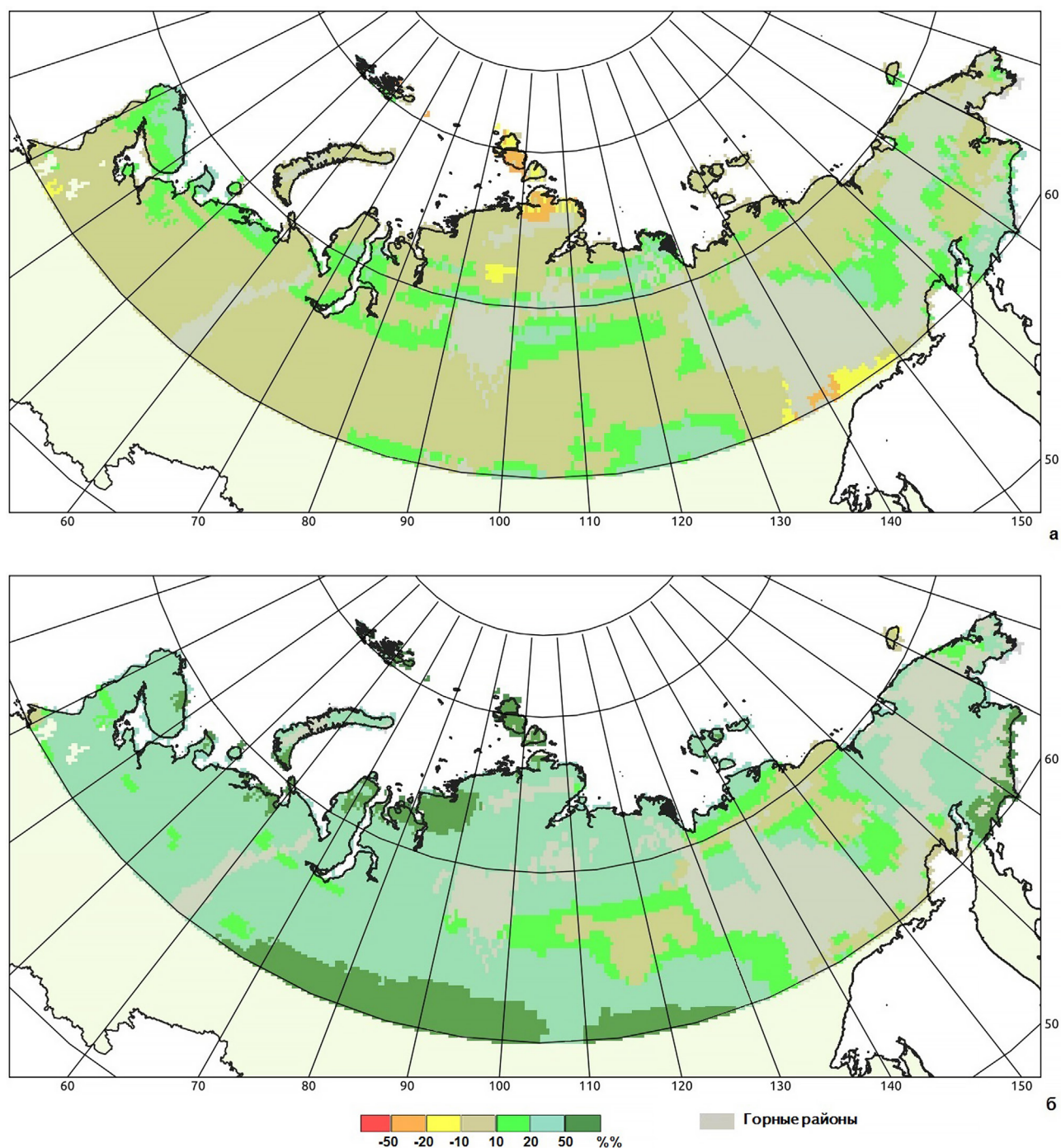
Результаты модельных расчетов изменения первичной биологической продукции растительности северных экосистем России к концу XXI в. при ожидаемых климатических изменениях представлены на рисунке 2. По климатическому сценарию SSP1-2.6 к концу XXI в. для большей части рассматриваемой территории России значения продуктивности растительного покрова изменятся незначительно (от –10 % до +10 %), по сравнению со значениями во второй половине XX в. (рис. 2а). В северной части Кольского полуострова, на территории Лено-Вилуйского междуречья вероятно

возрастание значений продуктивности растительного покрова на 20–50 %. В южной части Кольского полуострова, северной части Карелии, в ряде тундровых и лесотундровых экосистем Европейской части России и Западной Сибири, в лиственных лесах южной части Колымской низменности и нижнего течения реки Оленёк (Средняя Сибирь) вероятно повышение продуктивности растительного покрова на 10–20 %. В некоторых экосистемах северной части полуострова Таймыр и северного побережья Охотского моря возможно уменьшение продуктивности растительности на 10–20 %.

Согласно климатическому сценарию SSP5-8.5 для развития растительного покрова рассматриваемых экосистем сложатся благоприятные климатические условия (рис. 2б). На значительной части рассматриваемой территории России к концу XXI в. значения продуктивности растительного покрова возрастут на 20–50 %, по сравнению со значениями во второй половине XX в. В ряде тундровых экосистем полуостровов Ямал, Гыданский, Таймыр, а также в среднетаежных экосистемах Западной и Средней Сибири продуктивность растительного покрова может увеличиться более чем на 50 %. Согласно этому климатическому сценарию, увеличение продуктивности лиственных лесов среднего течения реки Лены, растительного покрова экосистем Яно-Индибирской и Колымской низменностей возможно не более чем на 20 %, по сравнению с данными наблюдений второй половины XX в.

Модельные расчеты позволили выявить пространственные тенденции и масштабы вероятных изменений продуктивности растительного покрова северных экосистем России. Согласно сделанным оценкам можно ожидать существенное увеличение первичной биологической продукции в достаточно протяженном широтном диапазоне произрастания бореальных лесов. В то же время следует отметить значительные региональные различия возможных изменений продуктивности растительности северных экосистем России при разных сценариях климатических изменений. Существенное значение для анализа углеродного обмена между атмосферой и рассматриваемыми экосистемами имеет выявление районов изучаемой территории России, в которых возможны наиболее значительные изменения величины первичной биологической продукции, по сравнению с данными наблюдений второй половины XX в.





**Рис. 2.** Картограммы изменения (в %) значений первичной биологической продукции изучаемых северных экосистем России к концу XXI в., по сравнению с данными второй половины XX в., согласно климатическим сценариям SSP1-2.6 (а) и SSP5-8.5 (б)

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-б) и в рамках Государственного задания ИФА им. А.М. Обухова РАН «Моделирование влияния изменений климата на экологические процессы и системы» (рег. № 1021032424681-б).

**Список литературы**

1. Canadell J.G., Monteiro P.M.S., Costa M.H. et al. Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks // *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and N.Y., USA: Cambridge University Press, 2021. P. 673–816.
2. Golubyatnikov L.L., Mokhov I.I., Denisenko E.A., Tikhonov V.A. Model estimates of climate change impact on the vegetation cover and atmospheric carbon sink // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2005. Vol. 41. No. 1. P. 19–28.
3. Gutjahr O., Putrasahan D., Lohmann K. et al. Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2) for the High-Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP) // *Geoscientific Model Development*. 2019. No. 12. P. 3241–3281.
4. Eyring V., Bony S., Meehl G.A., Senior C.A., Stevens B., Stouffer R.J., Taylor K.E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // *Geoscientific Model Development*. 2016. No. 9. P. 1937–1958.
5. O'Neill B.C., Tebaldi C., van Vuuren D.P. et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6 // *Geoscientific Model Development*. 2016. No. 9. P. 3461–3482.
6. Golubyatnikov L.L., Denisenko E.A. Model Estimates of Climate Change Impact on Habitats of Zonal Vegetation for the Plain Territories of Russia // *Biology Bulletin*. 2007. Vol. 34. No. 2. P. 170–184.
7. Базилевич Н.И. Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
8. Бобкова К.С., Машика А.В., Смагин А.В. Динамики содержания органического вещества в среднетаежных ельниках на автоморфных почвах. СПб.: Наука, 2014. 270 с.
9. Усольцев В.А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 569 с.

---

ESTIMATIONS OF RESPONSE OF THE NET PRIMARY PRODUCTION  
TO CLIMATE CHANGE FOR RUSSIAN NORTHERN ECOSYSTEMS

---

*L.L. Golubyatnikov*

Institute of Atmospheric Physics,  
Russian Academy of Sciences, Moscow,  
golub@ifaran.ru

---

**Abstract.** Vegetation of the northern ecosystems plays an important role in the regulation of energy and mass exchange in the atmosphere–land surface system of Northern Eurasia. A quantitative characteristic of the intensity of atmospheric carbon dioxide sequestration by plant communities is their net primary production (NPP). Regional NPP changes in the northern ecosystems under global climate warming in the 21<sup>st</sup> century at the territory of Russia are analyzed. We used output of the climate model MPI-ESM1-2-LR developed at the Max-Planck-Institute for Meteorology (Germany). Corresponding numerical experiments are performed under the aggressive SSP1-8.5 and moderate SSP1-2.6 climatic scenarios for the 21<sup>st</sup> century. The model developed at the Laboratory of Mathematical Ecology of the Institute of Atmospheric Physics (Russia) is used for a determination the NPP response for the northern ecosystems of Russian to possible climate changes. This model is based on the bioclimatic scheme in which the NPP is a function of the net radiation balance and annual evapotranspiration. To determine the bioclimatic scheme we used an experimental information about annual net primary production. We have obtained the estimates for future spatial patterns and levels for possible changes of the vegetation productivity over the territory of Russia under study for global climate warming in the 21<sup>st</sup> century. The results point to a significant NPP increase for fairly extended latitude range in Russian boreal forest. At the same time, we see regional differences for the possible NPP changes in the northern ecosystems for climatic scenarios under study.

**Keywords:** Tundra and boreal ecosystems, net primary production, climatic scenarios, atmospheric carbon update.

**References**

1. Canadel J.G., Monteiro P.M.S., Costa M.H. et al. 2021. *Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. P. 673–816.
2. Golubyatnikov L.L., Mokhov I.I. Denisenko E.A., Tikhonov V.A. 2005. Model estimates of climate change impact on the vegetation cover and atmospheric carbon sink. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 41(1): 19–28.
3. Gutjahr O., Putrasahan D., Lohmann K. et al. 2019. Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM1.2) for the High-Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP). *Geoscientific Model Development.* 12: 3241–3281.
4. Eyring V., Bony S., Meehl G.A. et al. 2016. Senior C.A., Stevens B., Stouffer R.J., Taylor K.E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development.* 9: 1937–1958.
5. O'Neill B.C., Tebaldi C., van Vuuren D.P. et al. 2016. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development.* 9: 3461–3482.
6. Golubyatnikov L.L., Denisenko E.A. 2007. Model Estimates of Climate Change Impact on Habitats of Zonal Vegetation for the Plain Territories of Russia. *Biology Bulletin.* 34(2): 170–184.
7. Bazilevich N.I. 1993. *Biologicheskaya produktivnost' ekosistem Severnoi Evrasii [Biological Productivity of Ecosystems in Northern Eurasia].* Moscow, Nauka: 293 p. (In Russian).
8. Bobkova K.S., Mashika A.V., Smagin A.V. 2014. *Dinamika sodержaniya organicheskogo veshchestva v srednetaezhnykh el'nikakh na avtomorfnykh pochvah. [Dynamics of carbon organic matter content of spruce forests in middle taiga growing on automorphic soils].* St. Petersburg, Nauka. 270 p. (In Russian).
9. Usoltsev V.A. 2010. *Fitomassa I pervichnaya produktsiya lesov Evrazii [Fitomass and Net Primary Production of Forests in Eurasia].* Ekaterinburg: Ural Branch Russ. Acad. Sci. 569 p. (In Russian).