

<https://doi.org/10.25686/foreco.2024.24.47.005>

УДК 574.91, 574.45

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОПУЛЯЦИИ ЕЛИ СИБИРСКОЙ В ГОРНУЮ ТУНДРУ ЮЖНОГО УРАЛА

Г.И. Ложкин^{1 2}, А.А. Григорьев^{3 4}

¹Казанский (Приволжский) Федеральный Университет

² Институт географии РАН

³ Институт экологии растений и животных УрО РАН

⁴ Национальный парк «Таганай»

Вследствие происходящих изменений климата важная роль уделяется созданию моделей миграции популяций. Для калибровки и верификации прогнозных моделей необходимы данные, состоящие из многолетних наблюдений, имеющих пространственную привязку. В работе представлен экспериментальный метод оценки древесной фитомассы для 9 пробных площадей на горе Дальний Таганай, расположенной в северной части Южного Урала. Полученные оценки сопоставлены с данными дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ). Среди всех использованных каналов и индексов лучший результат показали каналы видимого спектра. На их основе рекомендуется производить визуальное выделение границ распространения леса на горе Дальний Таганай с целью построения прогнозных моделей в будущем.

Ключевые слова: Landsat, тундра, ель сибирская, оценка фитомассы, экотон

USING EARTH REMOTE SENSING DATA TO ASSESS THE SPREAD OF SIBERIAN SPRUCE POPULATION IN THE MOUNTAIN TUNDRA OF THE SOUTHERN URALS

G.I. Lozhkin^{1 2}, A.A. Grigoriev^{3,4}

¹Kazan (Volga Region) Federal University

² Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences

³ Institute of Plant and Animal Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

⁴ Taganay National Park

Due to ongoing climate change, an important role is given to the creation of population migration models. To calibrate and verify forecast models, data consisting of long-term observations with spatial reference are required. The paper presents an experimental method for assessing tree phytomass for 9 sample plots on Mount Dalniy Taganay, located in the northern part of the Southern Urals. The obtained estimates are compared with Earth remote sensing data (ERSD). Among all the channels and indices used, the best result was shown by the visible spectrum channels. Based on them, it is recommended to visually highlight the boundaries of forest distribution on Mount Dalniy Taganay in order to build forecast models in the future.

Keywords: *Landsat, tundra, Siberian spruce, phytomass assessment, ecotone*

Введение

Климат является основным фактором, регулирующим пространственное распределение видов и экосистем (Davis, 1986; Wang et al., 2016), в том числе это проявляется и в исчезновении видов (Weiskopf et al., 2020). Кроме климата, в числе важных факторов выделяют внутривидовые и межвидовые взаимодействия, эволюционные изменения, а также особенности распространения видов (Pearson, Dawson, 2003). Анализ глобальных циркуляционных моделей и глобальных моделей растительности показал, что глобальные климатические изменения увеличат скорость миграции видов по сравнению с постгляциалом, что может привести к изменению биоразнообразия в пользу более мобильных видов (Malcolm et al., 2002).

В этой связи большее внимание уделяется моделям миграции популяции. Информация о том, как биологические инвазии могут происходить во времени и пространстве, позволяет разрабатывать лучшие стратегии по минимизации ущерба (Hughes et al., 2024). Начиная со второй половины 20-го века широкое применение для пространственно-временного моделирования биологических инвазий получили диффузионные модели популяции (Skellam, 1951). Помимо пространственного распространения в этих моделях также существует возможность учета внутривидовых и межвидовых взаимодействий (Holmes et al., 1994; Jesse, 1999; Okubo & Levin, 2001). Ценными источниками данных для калибровки и верификации таких моделей могут являться данные дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) (Richit et al., 2019).

Согласно докладу второй рабочей группы ИРСС, зоны тайги и тундры Урала входят в число “biodiversity hotspots” - территорий, выделяющихся высоким видовым разнообразием, на которых встречаются редкие и эндемичные виды. Анализ прогнозируемого потепления климата показал, что “biodiversity hotspots” продолжат испытывать наибольшее повышение температуры в более высоких широтах Северного полушария, особенно в районах тундры (Costello et al., 2022a). Так, при увеличении температуры на 2,5 °C площадь современной зоны тайги и тундры Урала сократится на 70-83% (Costello et al., 2022b). За последние десятилетия из-за повышения верхней границы распространения леса на ряде вершин Южного Урала наблюдается полное исчезновение горных тундр (Шиятов и др., 2020; Григорьев и др., 2023). Поэтому оценка возможности использования данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ) при моделировании распространения леса на Южном Урале является важной задачей.

Целью данного исследования является оценка возможности использования ДДЗЗ при работе с диффузионными моделями популяции на Южном Урале. В частности, необходимо дать практические рекомендации по использованию вегетационных индексов или отдельных каналов, а также обозначить оптимальные временные рамки их использования по ходу года.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

- 1) Расчет оценки надземной фитомассы для n лет с доступными сценами Landsat на основе полевых данных;
- 2) Выгрузка и расчет индексов для территории, на которой проводились полевые работы;
- 3) Выполнение корреляционного анализа между рядами фитомассы и индексами или каналами Landsat.

Материалы и методы

Гора Дальний Таганай – плоскообразная вершина высотой 1112 м над ур. м. (55°22'10" с. ш., 59°54'27" в. д.), составляющая хр. Большой Таганай, расположенного в северной части гор Южного Урала. Доминирующий древесный вид – *Picea obovata* Ledeb., на отдельных участках *Betula pubescens* ssp. *tortuosa* Ledeb. Выше границы леса на открытых участках в тундре произрастает *Juniperus sibirica* (Григорьев и др., 2023). Экспансия леса на территорию горной тундры зафиксирована на разновременных ландшафтных фотоснимках (Шиятов и др., 2020)

Для оценки смещения границы между сомкнутым лесом и отдельными деревьями в тундре в июне 2022 года была заложена серия круговых пробных площадок радиусом 8.5 метра на склонах северо-западной и юго-западной экспозиции. Из этих площадок в данной работе использовались 9 площадок из двух разных профилей (рис. 1). Для каждого дерева на площадке фиксировались его местоположение и основные морфометрические характеристики: высота, диаметр на высоте 1,3 метра и у основания, а также диаметр кроны. Для каждого дерева были взяты образцы древесины (керны) в основании ствола, которые затем использовались для фиксации ширины радиального прироста деревьев. Принципы закладки пробных площадей, пробоотбор и обработка проб подробно описаны в работе Григорьева и др. (2023).

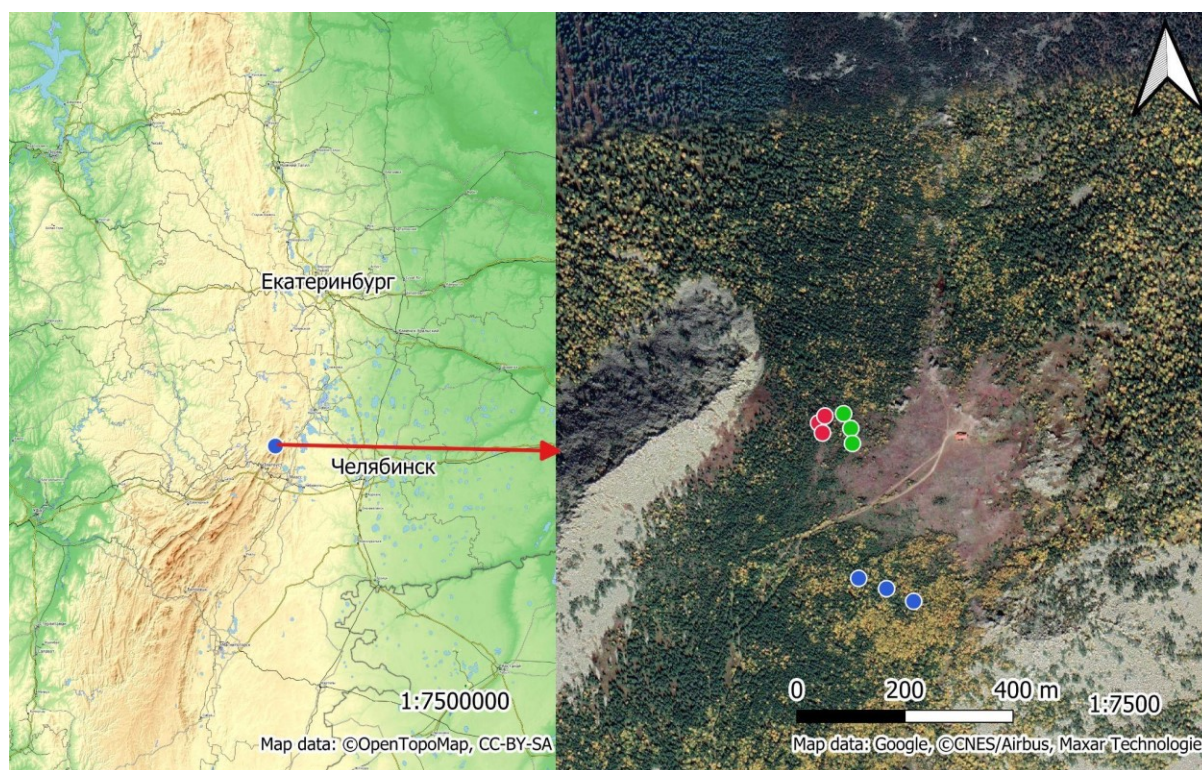


Рис. 1. Расположение территории исследования с указанием площадок. Синие точки - нижний уровень юго-западного профиля, красные точки - нижний уровень юго-западного профиля, зеленые точки - средний уровень юго-западного профиля.

С использованием измеренных значений диаметра основания ствола каждого дерева, а также значений радиального прироста из кернов, была получена оценка диаметра дерева в каждый год его жизни. Так как для деревьев, произрастающих на наклонённом субстрате, характерна асимметрия радиального прироста (Wang et al., 2023), оценки диаметра

пересчитывались с учётом асимметрии с использованием диаметра ствола, измеренного во время отбора кернов.

Основываясь на оценках диаметра ствола в каждый год d_0 , были получены оценки наземной фитомассы m деревьев *Picea obovata* по аллометрической формуле с параметрами из работы (Hagedorn et al., 2020), соответствующими Южному Уралу,

$$m=a*d_0^b \quad (\text{kg/tree}) \quad (1)$$

Затем масса каждого дерева суммировалась по году на каждой площадке. Таким образом была получена оценка фитомассы каждой площадки по годам.

Для того чтобы сопоставить полученные ряды с вегетационными индексами или отдельными каналами, были подготовлены сцены Landsat для каждой пробной площади. Поиск и скачивание сцен Landsat осуществлялись с использованием JavaScript-API для Google Earth Engine (GEE, Gorelick et al., 2017). В анализе использовались следующие наборы данных:

- SR USGS Landsat 5 Level 2, Collection 2, Tier 1 (1985-2012 годы);
- SR USGS Landsat 7 Level 2, Collection 2, Tier 1 (1999-2022 годы);
- SR USGS Landsat 8 Level 2, Collection 2, Tier 1 (2013-2022 годы).

Для каждой пробной площадки находилось среднее значение всех пикселей, попавших в соответствующий радиус. Затем была произведена фильтрация на отсутствие снега, облаков и тени от облаков на основе QA_PIXEL канала, а также были исключены пустые пиксели (NAN, чаще всего встречались в дефектных сценах Landsat 7). Для анализа использовались следующие каналы: ближний инфракрасный (NIR); красный (RED); синий (BLUE); зеленый (GREEN).

В качестве вегетационных индексов были выбраны NDVI и EVI, рассчитанные по стандартной методике (Solano et al., 2010). Одной из сложностей в работе с Landsat является неравномерное временное покрытие сценами, во многом это вызвано облаками. Уральские горы являются существенным препятствием на пути движения атлантических воздушных масс с запада на восток (Шиятов и др., 2020). Поэтому было принято решение не использовать в работе с индексами и каналами обобщенные значения для каждого года, такие как максимум, минимум, среднее, и кумулятивные показатели, например, площадь под кривой графика.

Для оценки связи вегетационных индексов или каналов с древесной фитомассой был выполнен корреляционный анализ для двухнедельных промежутков. То есть были сопоставлены оценки фитомассы площадок и индексы или каналы из Landsat в пары (“площадка-сцена”) по территориальному признаку. После этого эти пары группировались по двухнедельным интервалам, затем коэффициент корреляции Пирсона рассчитывался для каждой из полученных групп.

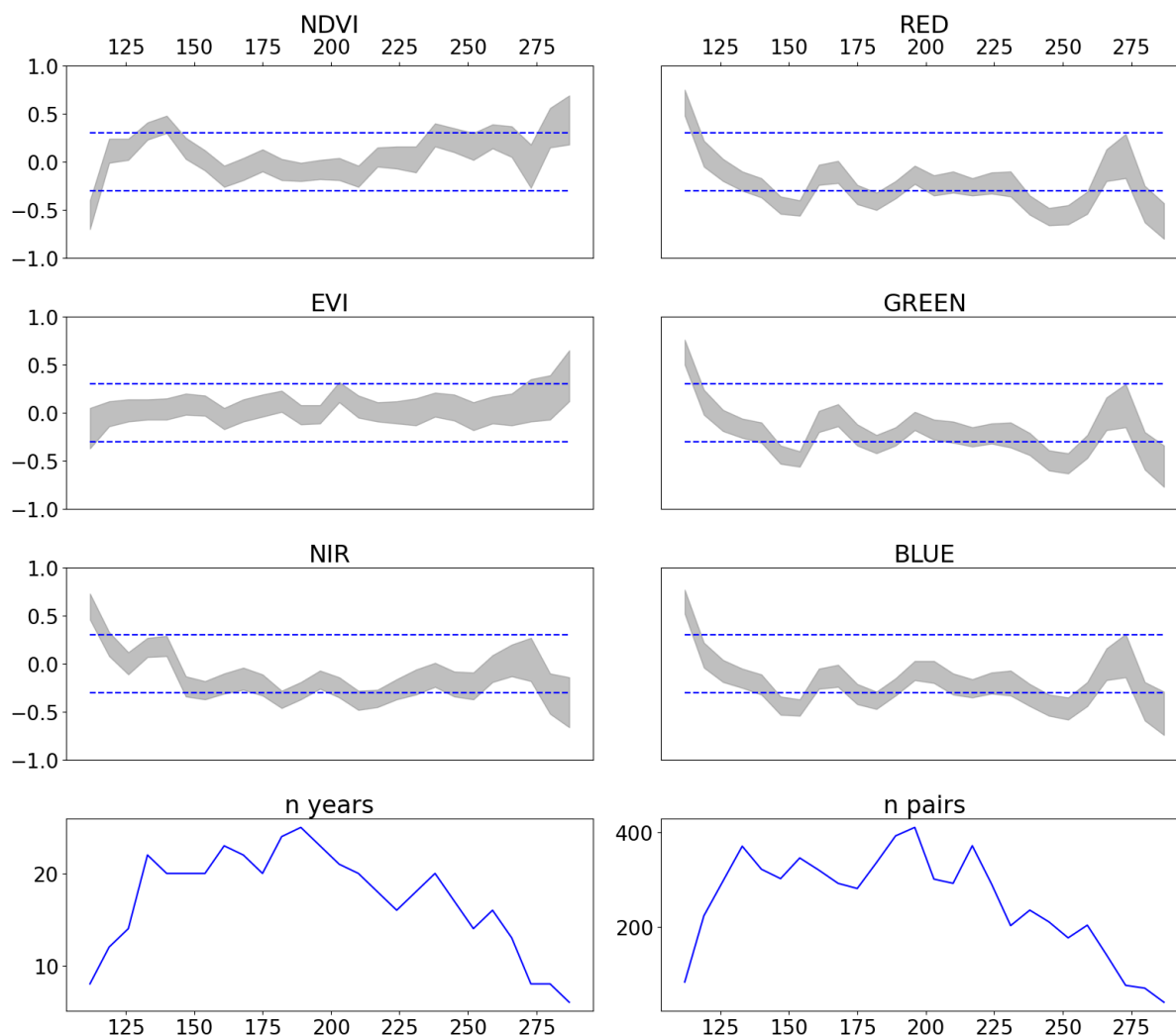


Рис. 2. Графики коэффициента корреляции Пирсона между оценкой фитомассы пробных площадей и показателями, полученными из сцен Landsat. По оси x отмечен порядковый номер дня в году. Значения коэффициента корреляции Пирсона между границами 95-процентного доверительного интервала показаны серым затенением. Синей штриховкой отмечены линии, соответствующие значениям коэффициента корреляции 0.3 и -0.3. На нижней панели слева - графики, показывающие, количество разных лет, использовавшихся при расчете, справа - количество пар “площадка-сцена”, использовавшихся при расчете.

Результаты и дискуссия

Результаты вышеописанных расчетов приведены в виде графика с ходом коэффициента корреляции в течение года (рис. 2). Серым затенением показаны границы 95-процентного доверительного интервала коэффициента корреляции. О наличии хотя бы слабой, но статистически значимой корреляции можно говорить на тех частях графиков, где серое затенение полностью выходит за пределы диапазона $[-0.3, 0.3]$. На концах графиков можно наблюдать существенные отклонения коэффициента корреляции от 0, которые объясняются относительно небольшим количеством лет и, соответственно, пар “площадка-сцена”, попавших в выборку.

Для горы Дальний Таганай не удалось установить корреляцию между вегетационными индексами и древесной фитомассой. Однако, каналы видимого спектра показали высокую согласованность в корреляционных графиках, со статистически значимой слабой корреляцией

в периоды с конца мая по начало июня и с конца августа до середины сентября. Корреляция в эти периоды принимает отрицательные значения, что согласуется с интуитивным представлением о том, что при увеличении древесной фитомассы на территории темнохвойных лесов полученные изображения будут темнее (все каналы RGB-синтеза будут ближе к нулю).

В качестве альтернативных источников ДДЗЗ были опробованы материалы MODIS и Sentinel-2, но они уступают Landsat с точки зрения временного охвата. Данные MODIS доступны только с 2000 года, а Sentinel-2 — с 2015 года. Данные MODIS представляют интерес с точки зрения регулярности получаемых серий, но из-за разрешения 250 м его нельзя использовать в задаче диффузии для процесса зарастания лесом вершины горы Дальний Таганай.

Также стоит отметить недостаток метода оценки фитомассы площадок по годам с использованием древесных кернов. Этот метод не учитывает смертность особей, а значит, оценка фитомассы каждой площадки показывает монотонный рост.

Выводы

Основываясь на полученных результатах, можно сделать вывод о нецелесообразности использования вегетационных индексов (NDVI и EVI) для калибровки или верификации диффузионных моделей популяции на вершине горы Дальний Таганай. Однако, в периоды с конца мая по начало июня и с конца августа до середины сентября имеет смысл использовать каналы видимого спектра, как в виде RGB-синтеза, так и по отдельности. Ввиду слабой корреляции, сцены для этих периодов будет перспективнее использовать для визуального выделения границ леса, а не для построения статистических моделей.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ 24-27-00338.

Библиографический список

1. Григорьев А.А., Клям Р.С., Вьюхин С.О., Громов А.М., Балакин Д.С., Воробьев И.Б., Шалаумова Ю.В. Пространственно-временная динамика продвижения древесной и кустарниковой растительности в горную тундру дальнего Таганая (Южный Урал) // Леса России и хозяйство в них, 2023. №3. С. 28-38. DOI: <https://doi.org/10.51318/fret.2023.3.86.004>
2. Шиятов С.Г., Моисеев П.А., Григорьев А.А. Фотомониторинг древесной и кустарниковой растительности в высокогорьях Южного Урала за последние 100 лет. Екатеринбург : УГЛУТУ, 2020. 191 с.
3. Costello M.J., Vale M.M., Kiessling W., Maharaj S., Price J., Talukdar G.H. Cross-Chapter Paper 1: Biodiversity Hotspots. Cambridge University Press. 2022. pp. 2123–2161, doi:10.1017/9781009325844.018.
4. Costello M.J., Vale M.M., Kiessling W., Maharaj S., Price J., Talukdar G.H. Cross-Chapter Paper 1: Biodiversity Hotspots Supplementary Material. 2022. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>.
5. Davis M.B. Climatic instability, time lags, and community disequilibrium // Community ecology, 1986, pp. 269–284.
6. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote Sensing of Environment, 2017. Vol. 202. pp. 18–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
7. Hagedorn F., Dawes M.A., Bubnov M.O., Devi N.M., Grigoriev A.A., Mazepa V.S., Nagimov Z.Y., Shiyatov S.G., Moiseev P.A. Latitudinal decline in stand biomass and productivity at the elevational treeline in the Ural mountains despite a common thermal growth limit // Journal of Biogeography, 2020. Vol. 47, Iss. 8. pp. 1827–1842). DOI: <https://doi.org/10.1111/jbi.13867>

8. Holmes E.E., Lewis M.A., Banks J.E., Veit R.R. Partial Differential Equations in Ecology: Spatial Interactions and Population Dynamics // *Ecology*, 1994. Vol. 75, Iss. 1. pp. 17–29. DOI: <https://doi.org/10.2307/1939378>
9. Hughes E.H., Moyers-Gonzalez M., Murray R., Wilson P.L. Partial differential equation models for invasive species spread in the presence of spatial heterogeneity // *PLOS ONE*, 2024. Vol. 19, Iss. 4. p. e0300968. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300968>
10. Jesse K.J. Modelling of a diffusive Lotka-Volterra-System: the climate-induced shifting of tundra and forest realms in North-America // *Ecological Modelling*, 1999. Vol. 123, Iss. 2–3. pp. 53–64. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0304-3800\(99\)00126-x](https://doi.org/10.1016/s0304-3800(99)00126-x)
11. Malcolm J.R., Markham A., Neilson R.P., Garaci M. Estimated migration rates under scenarios of global climate change // *Journal of Biogeography*, 2002. Vol. 29, Iss. 7. pp. 835–849. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2002.00702.x>
12. Okubo A., Levin S.A. Diffusion and Ecological Problems: Modern Perspectives // *Interdisciplinary Applied Mathematics*, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4978-6>
13. Pearson R.G., Dawson T.P. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? // *Global Ecology and Biogeography*, 2003. Vol. 12, Iss. 5. pp. 361–371. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1466-822x.2003.00042.x>
14. Richit L.A., Bonatto C., da Silva R.V., Grzybowski J.M.V. Prognostics of forest recovery with r.recovery GRASS-GIS module: an open-source forest growth simulation model based on the diffusive-logistic equation // *Environmental Modelling Software*, 2019. Vol. 111. pp. 108–120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.10.002>
15. Skellam J.G. Random Dispersal in Theoretical Populations // *Biometrika*, 1951. Vol. 38, Iss. 1/2. p. 196. DOI: <https://doi.org/10.2307/2332328>
16. Solano R., Didan K., Jacobson A., Huete A. MODIS vegetation index user's guide (MOD13 series). Vegetation Index and Phenology Lab, The University of Arizona. 2010. pp. 1-38.
17. Wang H., Qin J., Hu Y., Guo C. Asymmetric growth of belowground and aboveground tree organs and their architectural relationships: a review // *Canadian Journal of Forest Research*, 2023. Vol. 53, Iss. 5. pp. 315–327. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2022-0216>
18. Wang T., Wang G., Innes J., Nitschke C., Kang H. Climatic niche models and their consensus projections for future climates for four major forest tree species in the Asia-Pacific region // *Forest Ecology and Management*, 2016. Vol. 360. pp. 357–366. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.08.004>
19. Weiskopf S.R., Rubenstein M.A., Crozier L.G., Gaichas S., Griffis R., Halofsky J.E., Hyde K.J.W., Morelli T.L., Morissette J.T., Muñoz R.C., Pershing A.J., Peterson D.L., Poudel R., Staudinger M.D., Sutton-Grier A.E., Thompson L., Vose J., Weltzin J.F., Whyte K.P. Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States // *Science of The Total Environment*, 2020. Vol. 733. p. 137782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137782>

References

1. Grigorev A.A., Klyam R.S., Vyukhin S.O., Gromov A.M., Balakin D.S., Vorobev I.B., Shalaumova Yu.V. Prostranstvenno-vremennaya dinamika prodvizheniya drevesnoi i kustarnikovoï rastitel'nosti v gornuyu tundru dal'nego Taganaya (Yuzhnyi Ural) (Spatio-temporal dynamics of the advancement of tree and shrub vegetation into the mountain tundra of distant Taganay (Southern Urals)). *Lesa Rossii i khozyaistvo v nikh*, 2023. №3. pp. 28-38. DOI: <https://doi.org/10.51318/fret.2023.3.86.004>
2. Shiyatov S.G., Moiseev P.A., Grigorev A.A. Fotomonitoring drevesnoi i kustarnikovoï rastitel'nosti v vysokogor'yakh Yuzhnogo Urala za poslednie 100 let (Photomonitoring of tree and shrub vegetation in the highlands of the Southern Urals over the past 100 years). Ekaterinburg : UGLTU, 2020. 191 p.
3. Costello M.J., Vale M.M., Kiessling W., Maharaj S., Price J., Talukdar G.H. Cross-Chapter Paper 1: Biodiversity Hotspots. Cambridge University Press. 2022. pp. 2123–2161, doi:10.1017/9781009325844.018.
4. Costello M.J., Vale M.M., Kiessling W., Maharaj S., Price J., Talukdar G.H. Cross-Chapter Paper 1: Biodiversity Hotspots Supplementary Material. 2022. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>.
5. Davis M.B. Climatic instability, time lags, and community disequilibrium. *Community ecology*, 1986, pp. 269–284.

6. Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D., Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 2017. Vol. 202. pp. 18–27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
7. Hagedorn F., Dawes M.A., Bubnov M.O., Devi N.M., Grigoriev A.A., Mazepa V.S., Nagimov Z.Y., Shiyatov S.G., Moiseev P.A. Latitudinal decline in stand biomass and productivity at the elevational treeline in the Ural mountains despite a common thermal growth limit. *Journal of Biogeography*, 2020. Vol. 47, Iss. 8. pp. 1827–1842. DOI: <https://doi.org/10.1111/jbi.13867>
8. Holmes E.E., Lewis M.A., Banks J.E., Veit R.R. Partial Differential Equations in Ecology: Spatial Interactions and Population Dynamics // *Ecology*, 1994. Vol. 75, Iss. 1. pp. 17–29. DOI: <https://doi.org/10.2307/1939378>
9. Hughes E.H., Moyers-Gonzalez M., Murray R., Wilson P.L. Partial differential equation models for invasive species spread in the presence of spatial heterogeneity. *PLOS ONE*, 2024. Vol. 19, Iss. 4. p. e0300968. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300968>
10. Jesse K.J. Modelling of a diffusive Lotka-Volterra-System: the climate-induced shifting of tundra and forest realms in North-America. *Ecological Modelling*, 1999. Vol. 123, Iss. 2–3. pp. 53–64. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0304-3800\(99\)00126-x](https://doi.org/10.1016/s0304-3800(99)00126-x)
11. Malcolm J.R., Markham A., Neilson R.P., Garaci M. Estimated migration rates under scenarios of global climate change. *Journal of Biogeography*, 2002. Vol. 29, Iss. 7. pp. 835–849. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2699.2002.00702.x>
12. Okubo A., Levin S.A. Diffusion and Ecological Problems: Modern Perspectives. *Interdisciplinary Applied Mathematics*, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-4978-6>
13. Pearson R.G., Dawson T.P. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography*, 2003. Vol. 12, Iss. 5. pp. 361–371. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1466-822x.2003.00042.x>
14. Richit L.A., Bonatto C., da Silva R.V., Grzybowski J.M.V. Prognostics of forest recovery with r.recovery GRASS-GIS module: an open-source forest growth simulation model based on the diffusive-logistic equation. *Environmental Modelling Software*, 2019. Vol. 111. pp. 108–120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.10.002>
15. Skellam J.G. Random Dispersal in Theoretical Populations. *Biometrika*, 1951. Vol. 38, Iss. 1/2. p. 196. DOI: <https://doi.org/10.2307/2332328>
16. Solano R., Didan K., Jacobson A., Huete A. MODIS vegetation index user's guide (MOD13 series). Vegetation Index and Phenology Lab, The University of Arizona. 2010. pp. 1–38.
17. Wang H., Qin J., Hu Y., Guo C. Asymmetric growth of belowground and aboveground tree organs and their architectural relationships: a review. *Canadian Journal of Forest Research*, 2023. Vol. 53, Iss. 5. pp. 315–327. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2022-0216>
18. Wang T., Wang G., Innes J., Nitschke C., Kang H. Climatic niche models and their consensus projections for future climates for four major forest tree species in the Asia–Pacific region. *Forest Ecology and Management*, 2016. Vol. 360. pp. 357–366. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.08.004>
19. Weiskopf S.R., Rubenstein M.A., Crozier L.G., Gaichas S., Griffis R., Halofsky J.E., Hyde K.J.W., Morelli T.L., Morisette J.T., Muñoz R.C., Pershing A.J., Peterson D.L., Poudel R., Staudinger M.D., Sutton-Grier A.E., Thompson L., Vose J., Weltzin J.F., Whyte K.P. Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Science of The Total Environment*, 2020. Vol. 733. p. 137782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137782>