

Мониторинг границ биомов суши в глобальном масштабе по данным спутниковых наблюдений

© 2024. А. П. Шевырнов, д. т. н., г. н. с., заведующий лабораторией,
А. А. Ларько, ведущий математик, Г. С. Высоцкая, к. т. н., с. н. с.,
Т. И. Писман, к. б. н., с. н. с., Л. А. Сомова, д. б. н., в. н. с.,
Институт биофизики Сибирского отделения РАН,
660036, Россия, г. Красноярск, Академгородок, д. 50–50,
e-mail: lidsomova@mail.ru

Глобальное изменение климата приводит к трансформации и дисбалансу всех природных систем, к изменению границ биомов. В связи с этим возникла необходимость мониторинга границ наземных биомов и поиска методов определения границ биомов, экотон и контроля над ними. На основе многолетних данных дистанционного зондирования Земли за 21-летний период определены границы биомов во всех природно-климатических зонах суши. Методической основой исследования является использование скользящей дисперсии NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Рассчитана динамика дисперсий вегетационного индекса NDVI, созданы растровые карты, отражающие неоднородность распределения полей дисперсий NDVI. Дисперсия NDVI биомов (зон с определённым типом растительности) имеет относительно низкие значения по сравнению с переходными зонами между ними (экотонами). В экотонах дисперсия NDVI значительно увеличивается. Сравнительный анализ растровой карты среднегодового распределения дисперсий NDVI с векторной картой растительности показал совпадение биомов с областями NDVI, имеющими низкую величину дисперсии. Такое представление информации позволило по спутниковым данным выделить границы биомов. В работе показана пространственно-временная сезонная динамика дисперсий NDVI, степень изменчивости которой позволяет определять наступление определённых фенологических событий. Метод скользящей дисперсии NDVI эффективен для определения границ биомов, их смещения и для анализа сезонной динамики биосистем в определённых биоклиматических зонах.

Ключевые слова: нормализованный дифференциальный вегетационный индекс (NDVI), мониторинг биомов, дистанционное зондирование Земли, дисперсия NDVI, метод скользящего окна.

Monitoring the boundaries of terrestrial biomes on a global scale from data satellite observations

© 2024. А. П. Shevyrnogov ORCID: 0000-0001-8019-704X^{*}
А. А. Larko ORCID: 0000-0003-3691-451X^{*}, Г. С. Vysotskaya ORCID: 0000-0002-0434-7285^{*}
Т. I. Pisman ORCID: 0000-0001-8951-4662^{*}, Л. А. Somova ORCID: 0000-0002-7445-0384^{*}
Institute of Biophysics Siberian Branch RAS,
Akademgorodok 50-50, Krasnoyarsk, Russia, 660036,
e-mail: lidsomova@mail.ru

Global climate change leads to the transformation and imbalance of all natural systems, to a change in the boundaries of biomes. In this regard, it became necessary to monitor the boundaries of land biomes and to search for methods for determining the boundaries of biomes, ecotones and their control. The aim of this work is to monitor the boundaries of biomes, and to study the seasonal dynamics of NDVI dispersion. The methodological basis of the study is satellite observations and the NDVI moving dispersion method. The dynamics of the moving dispersion of NDVI biomes and ecotones of the land from 2000 to 2020 is estimated in the work. As a result of research, a raster map of the spatial distribution of NDVI dispersions for various biomes (plant communities) was constructed. The raster map of the dispersion distribution of NDVI vegetation is based on MODIS satellite data (product MCD12C1). It is shown that dispersions of NDVI biomes (zones with a certain type of vegetation) have low values. In the transition zones between biomes in ecotones, the dispersion of NDVI increases significantly. The raster map was compared with a biome vector map. The coincidence of biomes on vector biological maps and raster maps showing dispersions of NDVI was revealed. The main factors determining the boundaries of biomes are the spatial and temporal distribution of temperatures, the greatest changes of which occur in the south of the tundra zone and in the north-boreal forests. Studies of the dynamics of biotemperature in the tundra for the period 2001–2020 years showed a positive trend. The results of the spatial

distribution of NDVI dispersions over the seasons of the year (winter, spring, summer, and autumn) give an idea of the dynamics of phenological processes on a global scale.

Keywords: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), biome monitoring, Earth remote sensing, NDVI dispersion, moving split window method.

В настоящее время в связи с изменением климата возникла необходимость мониторинга границ биомов суши в глобальном масштабе. Возможности дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют следить за динамикой земной растительности (биомов) практически без ограничений по пространству и времени. Биом – совокупность экосистем одной природно-климатической зоны с одинаковым типом растительности. Это самые крупные подразделения биосферы [1]. Биомы отличаются друг от друга климатом, температурой и влажностью. Глобальное изменение климата приводит к трансформации и разбалансировке всех природных систем, к изменению границ биомов [2, 3]. Многочисленные примеры изменений биоценозов в биомах, характеристик популяций, видового разнообразия, изменения продуктивности отражены во многих публикациях [4–6]. Согласно современным климатическим моделям, в период с 1990 по 2100 гг. предполагается глобальное потепление от 1,4 до 5,8 °C [7], а также широтные сдвиги границ биомов до 400 км и изменение ширины экотонов [8, 9].

В настоящее время для изучения биосистем и их компонентов применяется картографирование с использованием ГИС-технологий, данные ДЗЗ и трудоёмкие полевые исследования [10, 11].

Изучение пространственно-временных изменений биосистем в глобальном и региональном масштабе, вызванных влиянием природных и антропогенных факторов, является одной из важнейших задач экологии [12]. А поиск способов и методов определения границ биомов, экотонов и их контроль является необходимостью при изменении климата.

Целью настоящей работы является мониторинг границ биомов и исследование сезонной динамики дисперсии NDVI в глобальном масштабе.

Объекты и методы исследования

В данной работе оценивается динамика скользящей дисперсии NDVI биомов и экотонов суши с 2000 по 2020 гг. В результате исследований построена растровая карта пространственного распределения дисперсий

NDVI для различных растительных сообществ и урбанизированных территорий. Пространственное распределение дисперсий NDVI по сезонам года даёт представление о динамике фенологических процессов. Растровая карта распределения дисперсий NDVI растительности сопоставляется с картой растительности (биомов), полученной на основе спутниковых данных MODIS (продукт MCD12C1).

Для описания динамики растительного покрова использовали вегетационный индекс NDVI [13], который основан на отражении и поглощении растительностью электромагнитного излучения в красном и ближнем инфракрасном диапазоне (1). Это простой показатель количества фотосинтетически активной биомассы и универсальный индикатор как сезонной, так и многолетней динамики продуктивности растительности.

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (1),$$

где NIR – процент отражённой радиации в ближнем инфракрасном диапазоне, RED – процент отражённой радиации в красном диапазоне.

Значения NDVI получены на основе данных сканера MODIS спутника Terra, в работе использован продукт MOD13C2. Разрешение 8 км (на линии экватора). Масштаб глобальный. Временной ряд наблюдений с 2000 по 2020 гг. Данные представляют собой месячные композитные изображения NDVI. В работе использован метод скользящего окна дисперсии NDVI, который впервые был применён для описания динамики хлорофилла в океане в 1996 г. авторами данной работы [14]. Метод скользящего окна дисперсии NDVI в экологических исследованиях суши стал использоваться недавно, несмотря на его простоту, надёжность и эффективность [15, 16].

Нами разработана методика оценки пространственного распределения скользящей дисперсии NDVI для оценки неоднородности растительности, так называемая процедура STA (Seasonal Trend Analysis) [17]. Для каждой точки изображения строились окна различной ширины, внутри которых рассчитывалась дисперсия NDVI по пространству и времени. Для анализа результатов динамики

пространственного распределения дисперсий NDVI в глобальном масштабе наиболее оптимальным оказалось окно размером 5×5 пикселей. Шкала (легенда) для оценки дисперсии NDVI разработана авторами.

Значения среднегодовых биотемператур вычислены по данным сайта Climatic Research Unit (<http://www.cru.uea.ac.uk/data>) за период с 2001 по 2020 гг. с разрешением 0.5°×0.5°. При вычислении среднегодовой биотемпературы принимаются во внимание только среднемесячные температуры выше нуля, температуры ниже нуля при суммировании учитываются как 0 °C [18].

Результаты и обсуждение

Многолетняя динамика дисперсий NDVI в глобальном масштабе. Пространственное распределение дисперсий NDVI показано на растровой карте (рис. 1, см. цв. вкладку II). Дисперсии рядов NDVI растительности суши отражают границы различных биомов. На рисунке зелёным цветом показаны области с низкими значениями дисперсии индекса NDVI, это зоны с одинаковым типом растительности, то есть биомы. Зоны с повышенной дисперсией значений NDVI на границах биомов показаны красным и белым цветом – это переходные зоны – экотоны. Именно они первыми реагируют на изменение внешних условий и поэтому являются индикаторами изменения экологического состояния экосистем.

Далее проведён сравнительный анализ биомов на растровой карте (рис. 1) и карте растительности (рис. 2, см. цв. вкладку II).

На рисунке 2 показано глобальное распределение растительности (биомов) на карте мира. По Международной геосферно-биосферной программе (МГБП) 17 классов растительного покрова были объединены в 9 классов. Леса – 21%, кустарники – 19%, саванны – 14%, пастбища – 9%, пахотные земли – 9%, мозаика пахотных земель и естественной растительности – 2%, бесплодные – 14%, городские – 0,5%, водно-болотные угодья – 0,2% и другие (снег и лёд, водоёмы – 11%) [19].

Сравнительный анализ растровой карты среднегодового распределения дисперсий NDVI, показывающих границы биомов (рис. 1), и векторной карты растительности (рис. 2) выявил, в основном, совпадение биомов на представленных картах. Наземные биомы обычно классифицируются по одинаковому типу растительности. Однако некоторые био-

мы по своей природе являются сложными по сочетанию типов растительности. К ним относятся антропогенно преобразованные районы (пахотные земли) и пастбищно-кустарниковые районы, поэтому там отмечаются более высокие значения дисперсии NDVI «внутри» биома (рис. 1).

Современные данные о границах биомов суши необходимы для понимания глобальных изменений в биосфере. На растровых картах (рис. 1) можно видеть как границы биомов, так и «экотонную мозаику» на границах биома и внутри биома (красные точки – повышенная дисперсия NDVI). «Красная мозаика» внутри биомов – это сочетание экосистем, формирующих биомы. Она не может быть обнаружена на векторной карте растительности, а используемый метод скользящей дисперсии даёт такую возможность. Изменение границ биомов и широтных размеров экотонов – фактор их динамики. Степень размытости границ биомов – это мера их изменчивости.

На рисунке 3 (см. цв. вкладку III) представлены результаты исследования динамики биотемпературы на территории тундры за период 2001–2020 гг. За этот период отмечен положительный тренд биотемпературы.

Анализ климатических изменений подтверждает, что интенсивный рост температуры воздуха наблюдается на территории Северной Евразии [20, 21]. Отмечено, что наибольшим изменениям подвергаются самые северные биомы, это юг тундровой зоны и северобореальные леса. Области наибольшего изменения – это северные и южные экотоны бореальных лесов Северного полушария [21, 22].

Таким образом, применение метода скользящего окна дисперсии NDVI позволяет в глобальном масштабе устанавливать реальные границы биомов суши и их смещение по увеличению дисперсии NDVI. Метод скользящего окна дисперсии NDVI может использоваться не только для контроля границ биомов, но и для определения «экологической» чувствительности экосистем к климату.

Сезонная динамика дисперсий NDVI различных биомов за период 2000-2020 гг. в глобальном масштабе. Продолжительность вегетационного периода является важной биоклиматической характеристикой, которая определяет фотосинтетическую активность (продуктивность) экосистем, а также является индикатором глобального потепления. На рисунке 4 (см. цв. вкладку III) показано пространственное распределение дисперсий NDVI по сезонам года (зима, весна, лето, осень),

**А. П. Шевырногов, А. А. Ларько, Г. С. Высоцкая,
Т. И. Письман, Л. А. Сомова**
**«Мониторинг границ биомов суши в глобальном масштабе
по данным спутниковых наблюдений». С. 29.**

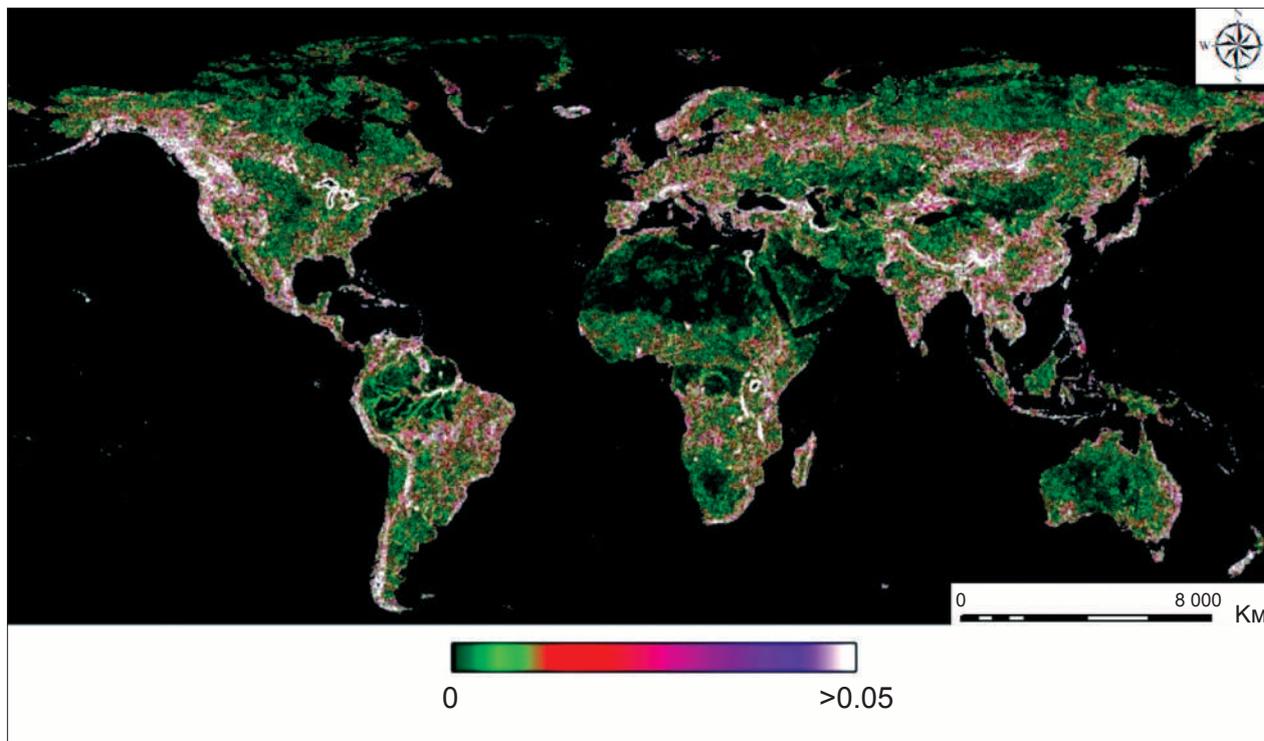


Рис. 1. Дисперсии NDVI различных биомов (2000–2020 гг.).
 Дисперсия: низкая – зелёный цвет; повышенная – красный цвет; высокая – белый цвет
Fig. 1. Dispersions of NDVI of various biomes (2000–2020).
 Dispersion: low – green; increased – red color; high – white color

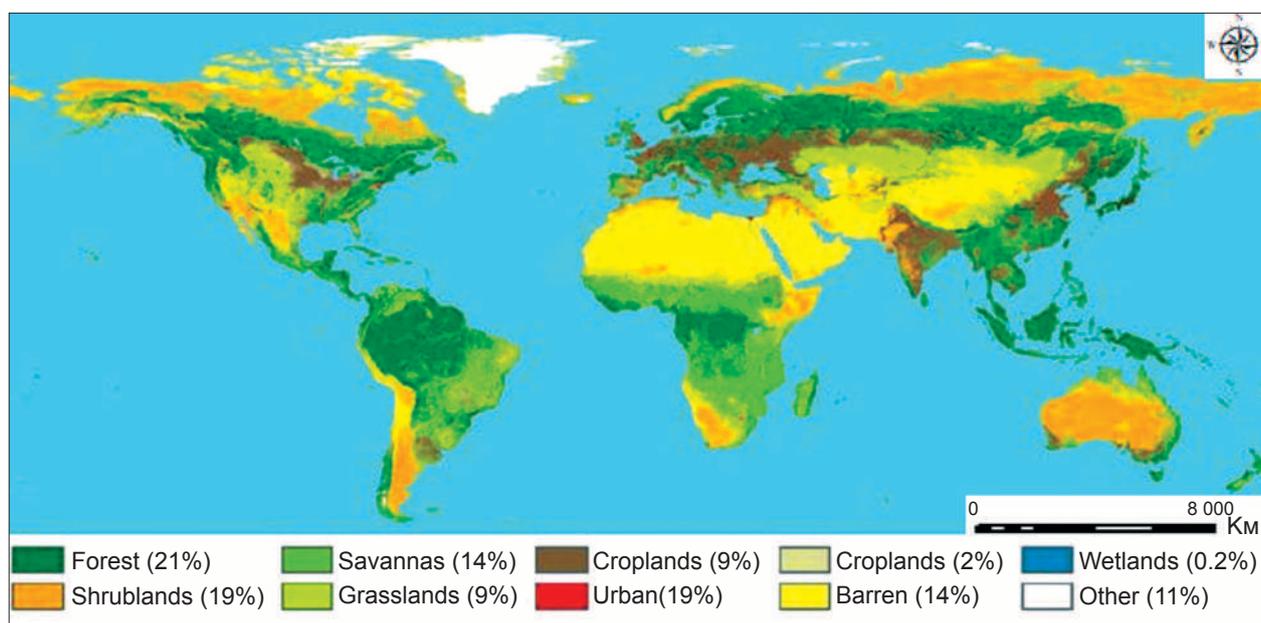


Рис. 2. Глобальное распределение растительности (биомов) на основе спутниковых данных MODIS (продукт MCD12C1). <https://seos-project.eu/landuse/landuse-c01-ws01-s.html>
Fig. 2. Global distribution of vegetation (biomes) based on MODIS satellite data (product MCD12C1)

**А. П. Шевырногов, А. А. Ларько, Г. С. Высоцкая,
Т. И. Письман, Л. А. Сомова**
**«Мониторинг границ биомов суши в глобальном масштабе
по данным спутниковых наблюдений». С. 29.**

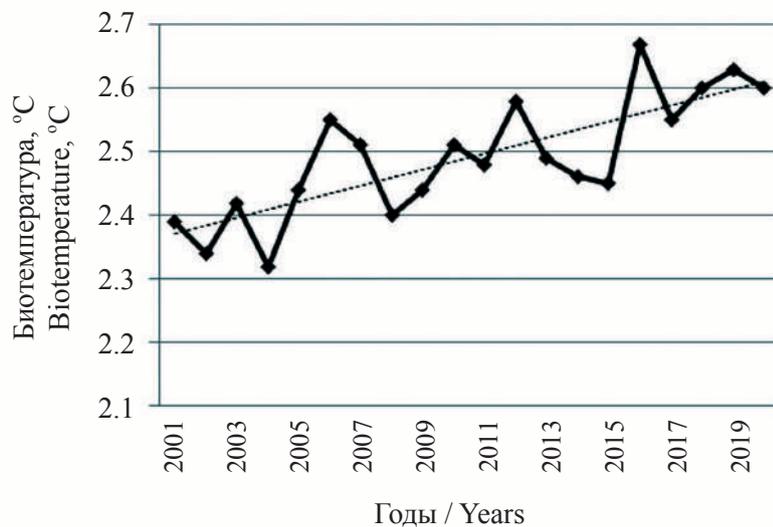


Рис. 3. Динамика биотемпературы на территории тундры за 2001–2020 гг.
Fig. 3. The dynamics of biotemperature in the tundra for 2001–2020

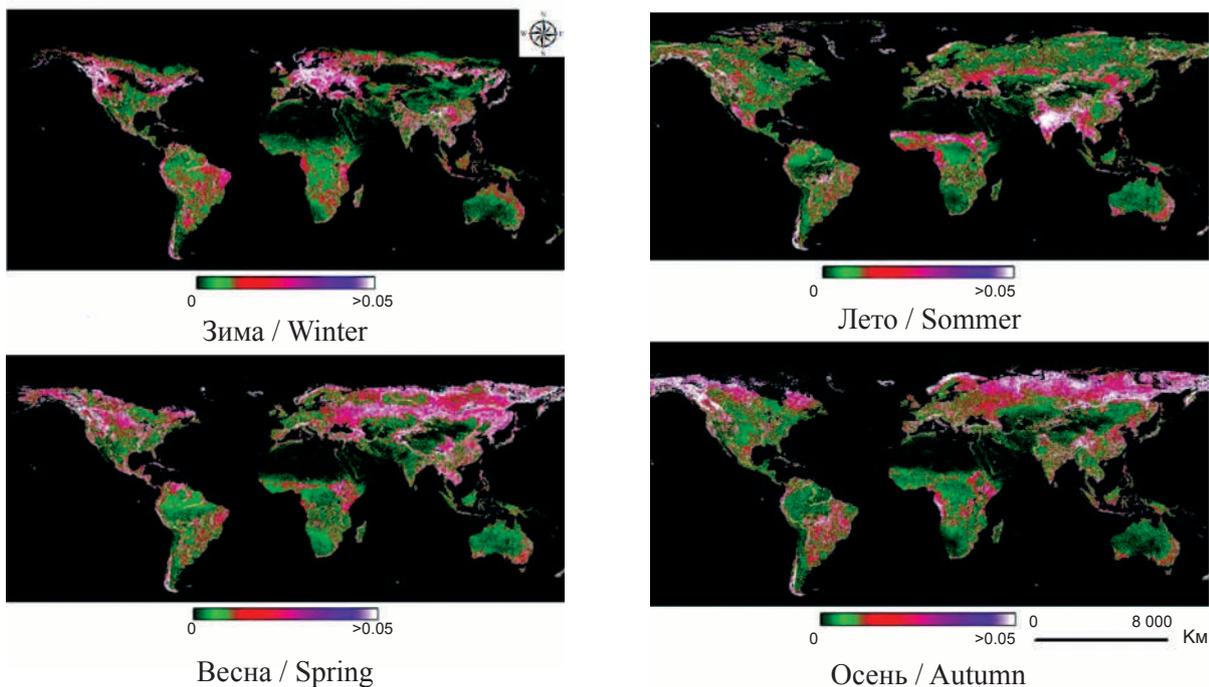


Рис. 4. Пространственное распределение дисперсий NDVI за период 2000–2020 гг. в течение вегетационного сезона (зима, весна, лето и осень)
Fig. 4. The spatial distribution of NDVI dispersions for the period 2000–2020 during the growing season (winter, spring, summer and autumn)

которое даёт представление о фенологических событиях.

Использование процедуры STA позволило обнаружить, что наиболее характерными областями динамики дисперсий NDVI является Северное полушарие (рис. 4). Значимые дисперсии NDVI отмечены весной и осенью в биоммах тайги, тундры, широколиственных лесах, в пастбищных и кустарниковых районах, а также и в антропогенно преобразованных районах (пахотные земли). В биоме вечнозелёных тропических лесов сезонные изменения значений дисперсии NDVI незначительны. В статье [23] авторы выявили незначительные изменения сезонной динамики растительности (появление листьев, старение листьев и опадение листьев), что согласуется с нашими данными.

Более половины (56,30%) биомов суши демонстрируют значительные сезонные тренды NDVI, из них почти половина (46,10%) значимых трендов принадлежит биомам тайги, тундры, широколиственным лесам и антропогенно преобразованным районам (пахотные земли) [22]. По сравнению с наземными исследованиями спутниковое дистанционное зондирование на основе метода скользящего окна дисперсии NDVI даёт возможность оценивать фенологию растительности в глобальном масштабе с высокой временной частотой. Данные космической съёмки являются объективными, они охватывают значительные площади, имеют относительно низкую стоимость по сравнению с другими методами [24].

Заключение

На основе многолетних спутниковых данных и метода скользящей дисперсии NDVI определены границы биомов во всех природно-климатических зонах Земли. Созданы растровые карты многолетней динамики дисперсий временных рядов NDVI.

Дисперсии NDVI биомов (зон с определённым типом растительности) имеют низкие значения, в то время как дисперсии NDVI экотонов (переходных зон между биомами) – высокие значения. Выявлено совпадение биомов на векторных биологических картах и растровых картах распределения дисперсий NDVI, показывающих границы биомов.

Предложенный метод использует спутниковую информацию, позволяющую вести мониторинг в глобальном масштабе с высокой повторяемостью. Такой подход позволяет всегда получать актуальную информацию о состоянии, аномалиях и трендах раститель-

ного покрова биосферы Земли. Это открывает большие возможности для получения фундаментальных знаний о функционировании биосферы – её ответ на глобальное потепление, движение границ вечной мерзлоты, глобальный газообмен и т. д. Также возможно и практическое применение метода при обнаружении аномалий динамики биомов, планировании хозяйственного развития регионов с учётом трендов и направлений динамики экотонов (границ разделов известных биомов).

Результаты анализа пространственного распределения дисперсий NDVI на растровых картах за период 2000–2020 гг. в течение вегетационного сезона (зима, весна, лето и осень) дают возможность оценивать фенологические события в глобальном масштабе.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 0287-2021-0018).

Литература

1. Одум Ю. Основы экологии. Москва: Мир, 1986. Т. 1. 328 с.
2. Nelson E., Kareiva P., Ruckelshaus M., Arkema K., Geller G., Girvetz E., Goodrich D., Matzek V., Pinsky M., Reid W., Saunders M., Semmens D., Tallis H. Climate change's impact on key ecosystem services and the human well-being they support in the US // *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2013. V. 11. No. 9. P. 483–493. doi: 10.1890/120312
3. Жильцова Е.Л., Анисимов О.А. Динамика растительности северной Евразии: анализ современных наблюдений и прогноз на 21 век // *Арктика XXI век. Естественные науки*. 2015. № 2. С. 48–59.
4. Feeley K.J., Silman M.R., Bush M.B., Farfan W., Cabrera K.G., Malhi Ya., Meir P., Revilla N.S., Quisipangui M.N.R., Saatchi S. Upslope migration of Andean trees // *Journal of Biogeography*. 2011. V. 38. No. 4. P. 783–791. doi: 10.1111/j.1365-2699.2010.02444.x
5. Буренина Т.А., Назимова Д.И. Географические исследования лесов Сибири // *География и природные ресурсы*. 2007. № 3. С. 165–172.
6. Корниенко С.Г. Оценка трансформаций природных ландшафтов Тазовского полуострова по данным космической съёмки // *География и природные ресурсы*. 2011. № 1. С. 67–73.
7. Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds. R.K. Pachauri, L.A. Meyer. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. 151 p.
8. Gonzalez P., Neilson R.P., Lenihan J.M., Drapek R.J. Global patterns in the vulnerability of ecosystems to veg-

etation shifts due to climate change // *Global Ecology and Biogeography*. 2010. V. 19. No. 6. P. 755–768. doi: 10.1111/j.1466-8238.2010.00558.x

9. Morin X., Thuiller W. Comparing niche and process based model store duce prediction un certainty in species range shifts under climate change // *Ecology*. 2009. V. 90. P. 1301–1313. doi: 10.1890/08-0134.1

10. Остроухов А.В. Оценка динамики антропогенной трансформации темныхвойных лесов северного Сихотэ-Алиня на основе дистанционного зондирования // *География и природные ресурсы*. 2014. № 1. С. 155–160.

11. Хромых В.В., Хромых О.В. Использование ГИС-технологий для изучения динамики долинных ландшафтов (на примере долины Нижней Томи) // *Вестник Томского государственного университета*. 2007. № 300. С. 230–233.

12. Васильев А.В. Комплексный экологический мониторинг негативного воздействия нефтесодержащих отходов в районах нефтяных месторождений как объекта экологического риска // *Теоретическая и прикладная экология*. 2023. № 4. С. 78–84. doi: 10.25750/1995-4304-2023-4-078-084

13. Myneni R.B., Hall F.G., Sellers P.J., Marshak A.L. The interpretation of spectral vegetation indexes // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1995. V. 33. P. 481–486. doi: 10.1109/36.377948

14. Shevyrnogov A.P., Vysotskaya G.S., Gitelson J.I. Quasistationary areas of chlorophyll concentration in the world ocean as observed satellite data // *Advances in Space Research*. 1996. V. 18. No. 7. P. 129–132.

15. Erdős L., Bátori Z., Tölgyesi C.S., Kórmöczi L. The moving split window (msw) analysis in vegetation science – an overview // *Applied Ecology and Environmental Research*. 2014. V. 12. No. 3. P. 787–805. doi: 10.15666/aeer/1203_787805

16. Kormoczi L., Batori Z., Erdos L., Tolgyesi Cs., Zalatnai M. The role of randomization tests in vegetation boundary detection with moving split-window analysis // *Journal of Vegetation Science*. 2016. V. 27. No. 6. P. 1288–1296. doi: 10.1111/jvs.12439

17. Шевырногов А.П., Ларько А.А., Высоцкая Г.С., Сомова Л.А. Определение границ биомов на территории Евразии по динамике дисперсии NDVI на основе спутникового мониторинга // *Успехи современного естествознания*. 2019. № 1. С. 123–128.

18. Holdridge L.R. The determination of atmospheric water movements // *Ecology*. 1962. V. 43. No. 1. P. 1–9. doi: 10.2307/1932033

19. Giri C., Zhub Z., Reed B. Comparative analyses of the Global Land Cover 2000 and MODIS land covers data sets // *Remote Sensing of Environment*. 2005. V. 94. No. 1. P. 123–132. doi: 10.1016/j.rse.2004.09.005

20. Overland J.E., Wang M.Y., Bond N.A. Recent temperature changes in the Western Arctic during spring // *Journal of Climate*. 2002. V. 15. P. 1702–1716.

doi: 10.1175/1520-0442(2002)015<1702:RTCITW>2.0.CO;2

21. Hudson J.M.G., Henry G.H.R. Increased plant biomass in a high Arctic heath community from 1981 to 2008 // *Ecol*. 2009. V. 90. No. 10. P. 2657–2663. doi: 10.1890/09-0102.1

22. Eastman J.R., Sangermano F., Machado E.A., Rogan J., Anyamba A. Global trends in seasonality of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), 1982–2011 // *Remote Sensing*. 2013. V. 5 (10). P. 4799–4818. doi: 10.3390/rs5104799

23. Xiao X., Zhang Q., Saleska S., Hutrya L., Moore B. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest // *Remote Sensing of Environment*. 2005. V. 94. No. 1. P. 105–122. doi: 10.1016/j.rse.2004.08.015

24. Ашихмина Т.Я., Рутман В.В., Адамович Т.А., Товстик Е.В. Мониторинг распространения *Heracleum sosnowskyi* на урбанизированных территориях по данным дистанционного зондирования Земли // *Теоретическая и прикладная экология*. 2023. № 3. С. 73–80. doi: 10.25750/1995-4304-2023-3-073-080

References

1. Odum Yu. *Fundamentals of Ecology*. Moskva: Mir, 1986. V. 1. 328 p. (in Russian).

2. Nelson E., Kareiva P., Ruckelshaus M., Arkema K., Geller G., Girvetz E., Goodrich D., Matzek V., Pinsky M., Reid W., Saunders M., Semmens D., Tallis H. Climate change's impact on key ecosystem services and the human well-being they support in the US // *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2013. V. 11. No. 9. P. 483–493. doi: 10.1890/120312

3. Zhiltsova E.L., Anisimov O.A. Vegetation dynamics in northern Eurasia: an analysis of modern observations and a forecast for the 21st century // *Arktika XXI vek. Yestestvennyye nauki*. 2015. No. 2. P. 48–59 (in Russian).

4. Feeley K.J., Silman M.R., Bush M.B., Farfan W., Cabrera K.G., Malhi Ya., Meir P., Revilla N.S., Quisiquyanqui M.N.R., Saatchi S. Upslope migration of Andean trees // *Journal of Biogeography*. 2011. V. 38. No. 4. P. 783–791. doi: 10.1111/j.1365-2699.2010.02444.x

5. Burenina T.A., Nazimova D.I. Geographical research of Siberian forests // *Geografiya i prirodnyye resursy*. 2007. No. 3. P. 165–172 (in Russian).

6. Kornienko S.G. Assessment of transformations of the natural landscapes of the Taz Peninsula according to satellite imagery // *Geografiya i prirodnyye resursy*. 2011. No. 1. P. 67–73 (in Russian).

7. *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / Eds. R.K. Pachauri, L.A. Meyer. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. 151 p.

8. Gonzalez P., Neilson R.P., Lenihan J.M., Drapek R.J. Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change // *Global Ecology and Biogeography*. 2010. V. 19. No. 6. P. 755–768. doi: 10.1111/j.1466-8238.2010.00558.x
9. Morin X., Thuiller W. Comparing niche and process based model store duce prediction un certainty in species range shifts under climate change // *Ecology*. 2009. V. 90. P. 1301–1313. doi: 10.1890/08-0134.1
10. Ostroukhov A.V. Evaluation of the dynamics of anthropogenic transformation of dark coniferous forests of northern Sikhote-Alin on the basis of remote sensing // *Geografiya i prirodnyye resursy*. 2014. No. 1. P. 155–160 (in Russian).
11. Khromykh V.V., Khromykh O.V. The use of GIS technology to study the dynamics of valley landscapes (on the example of the Lower Tom Valley) // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2007. No. 300. P. 230–233 (in Russian).
12. Vasilyev A.V. Complex ecological monitoring of negative impact of oil-containing waste in areas of oil fields as an object of ecological risk // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 4. P. 78–84 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-078-084
13. Myneni R.B., Hall F.G., Sellers P.J., Marshak A.L. The interpretation of spectral vegetation indexes // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1995. V. 33. P. 481–486. doi: 10.1109/36.377948
14. Shevyrnogov A.P., Vysotskaya G.S., Gitelson J.I. Quasistationary areas of chlorophyll concentration in the world ocean as observed satellite data // *Advances in Space Research*. 1996. V. 18. No. 7. P. 129–132.
15. Erdős L., Bátori Z., Tölgyesi C.S., Kőrmőczy L. The moving split window (msw) analysis in vegetation science – an overview // *Applied Ecology and Environmental Research*. 2014. V. 12. No. 3. P. 787–805. doi: 10.15666/aeer/1203_787805
16. Kormoczi L., Batori Z., Erdos L., Tolgyesi Cs., Zalattnai M. The role of randomization tests in vegetation boundary detection with moving split-window analysis // *Journal of Vegetation Science*. 2016. V. 27. No. 6. P. 1288–1296. doi: 10.1111/jvs.12439
17. Shevyrnogov A.P., Larko A.A., Vysotskaya G.S., Somova L.A. Determining the boundaries of biomes in Eurasia by the dynamics of NDVI dispersion based on satellite monitoring // *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*. 2019. No. 1. P. 123–128 (in Russian).
18. Holdridge L.R. The determination of atmospheric water movements // *Ecology*. 1962. V. 43. No. 1. P. 1–9. doi: 10.2307/1932033
19. Giri C., Zhub Z., Reed B. Comparative analyses of the Global Land Cover 2000 and MODIS land covers data sets // *Remote Sensing of Environment*. 2005. V. 94. No. 1. P. 123–132. doi: 10.1016/j.rse.2004.09.005
20. Overland J.E., Wang M.Y., Bond N.A. Recent temperature changes in the Western Arctic during spring // *Journal of Climate*. 2002. V. 15. P. 1702–1716. doi: 10.1175/1520-0442(2002)015<1702:RTCITW>2.0.CO;2
21. Hudson J.M.G., Henry G.H.R. Increased plant biomass in a high Arctic heath community from 1981 to 2008 // *Ecol*. 2009. V. 90. No. 10. P. 2657–2663. doi: 10.1890/09-0102.1
22. Eastman J.R., Sangermano F., Machado E.A., Rogan J., Anyamba A. Global trends in seasonality of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), 1982–2011 // *Remote Sensing*. 2013. V. 5 (10). P. 4799–4818. doi: 10.3390/rs5104799
23. Xiao X., Zhang Q., Saleska S., Hutyrá L., Moore B. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest // *Remote Sensing of Environment*. 2005. V. 94. No. 1. P. 105–122. doi: 10.1016/j.rse.2004.08.015
24. Ashikhmina T.Ya., Rutman V.V., Adamovich T.A., Tovstik E.V. Monitoring the distribution of *Heracleum sosnowskyi* in urban areas based on Earth remote sensing data // *Theoretical and Applied Ecology*. 2023. No. 3. P. 73–80 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-3-073-080