УДК 528.8:502

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ БИОМОВ НА ТЕРРИТОРИИ ЕВРАЗИИ ПО ДИНАМИКЕ ДИСПЕРСИИ NDVI НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА

Шевырногов А.П., Ларько А.А., Высоцкая Г.С., Сомова Л.А.

Институт биофизики СО РАН, Красноярск, e-mail: lidsomova@mail.ru

В настоящее время в биосфере происходят глобальные изменения: это изменение климата, продуктивности биомов суши, океана, водных ресурсов, химии атмосферы, экологических систем и биосферы в целом. Изменения в биосфере ставят перед исследователями задачу прогноза процессов, которые происходят в растительном покрове и экосистемах. Непосредственным и наиболее очевидным ответом экосистем на глобальные изменения является смещение границ биомов. Биомы – это совокупность экосистем, и они формируются под воздействием комплекса условий среды, в первую очередь – климата. В связи с изменением климата исследования границ биомов и входящих в них экологических систем стали быстро развивающейся частью современной экологии. Обнаружение и классификация изменений биомов и составляющих их экосистем является важной задачей для оценки как глобальных, так и пространственно локализованных изменений. В представленном исследовании на основе многолетних космических данных построены растровые карты пространственного распределения вегетационного индекса NDVI методом скользящего окна дисперсии по их среднесезонным значениям на территории Евразии. Сделано сравнение построенной растровой карты распределения NDVI и векторной карты растительности зон Евразии. Показана неоднородность пространственного распределения рядов NDVI. Неоднородность распределения рядов NDVI в основном совпадает с экотонами на границах биомов. Анализ многолетних временных рядов NDVI на основе скользящего окна дисперсии позволил выявить границы биомов и экотоны без использования наземных данных. Разработанный и апробированный метод скользящего окна дисперсии открывает новые возможности для получения фундаментальных знаний: о функционировании биосферы, о последствиях глобального потепления, об изменении границ вечной мерзлоты в глобальном масштабе.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, биомы, экотоны, природные зоны, метод скользящей дисперсии

DETERMINATION OF THE BIOMES LIMITS IN THE EURASIA TERRITORY BY THE NDVI DISPERSION DYNAMICS BASED ON SATELLITE MONITORING

Shevyrnogov A.P., Larko A.A., Vysotskaya G.S., Somova L.A.

Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, e-mail: lidsomova@mail.ru

Currently, global changes are occurring in the biosphere – these are climate change, the productivity of land, ocean, water, atmospheric chemistry, ecological systems and the biosphere as a whole. Changes occurring in the biosphere pose to researchers the task of predicting the processes that occur in vegetation and ecosystems. The immediate and most obvious response of ecosystems to global warming is to shift the boundaries of biomes. Biomes are a set of ecosystems, and they are formed under the influence of a set of environmental conditions, primarily climate. With climate change, the study of the boundaries of biomes and their ecological systems became a rapidly developing part of modern ecology. The detection and classification of changes in biomes and their constituent ecosystems is an important task for assessing both global and spatially local changes. In the present study, raster maps of the Normalized Differential Vegetation Index (NDVI) dispersion were obtained corresponding to the distribution of vegetation. They correspond to the distribution of vegetation. The averaged seasonal long-term space data for the territory of Eurasia were used. The spatial distribution heterogeneity of the NDVI series is shown. The heterogeneity of the NDVI time series distribution basically coincides with the ecotones at the boundaries of the biomes. The analysis of the NDVI long-term time series based on a moving dispersion window, made it possible to identify the boundaries of biomes and ecotones without using ground-based data. The developed and tested the method of the moving window of dispersion opens up new opportunities for obtaining fundamental knowledge: on the functioning of the biosphere, on the consequences of global warming, on changing the boundaries of permafrost on a global scale.

Keywords: remote sensing of the Earth, biomes, ecotones, natural zones, moving window dispersion method

В настоящее время в биосфере происходят глобальные изменения климата, продуктивности биомов суши, океана, водных ресурсов, химии атмосферы, экологических систем и биосферы в целом [1]. Глобальные изменения в биосфере [2] ставят перед исследователями задачу прогноза процессов, которые происходят в растительном покрове и экосистемах в целом. Появление методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса открыло принципиально новую возможность получения актуальной и регулярно обновляемой информации о состоянии наземных экосистем на различных уровнях (глобальном, региональном и т.д.).

Непосредственным и наиболее очевидным ответом экосистем на глобальные

изменения климата является смещение границ биомов. Биом характеризуется каким-либо основным типом растительности, и по объему биом, совпадает с географическим понятием «природная зона» [3]. Биомы – это совокупность экосистем, и они формируются под воздействием комплекса условий среды, в первую очередь – климата. Между биомами существуют переходные зоны – экотоны. Эта пограничная зона может иметь значительную протяженность, но она всегда меньше территории прилегающих к ней экосистем. Экотоны динамичны и изменения их местоположений можно использовать в качестве индикатора изменений окружающей среды и состояния экосистем. По ряду оценок, уже в первой четверти XXI в. климатическое воздействие на экосистемы достигнет критического уровня на большей части бореальной зоны Европейской территории России и Западной Сибири [4]. А на протяжении XXI в. смещение ареалов бореальных лесов на север произойдет в среднем на 500 км [5]. Согласно многочисленным прогнозам потепление в Арктическом регионе (к северу от 60-й параллели) будет значительно выше среднего уровня по планете. Средняя температура в Арктике возрастает почти в 2 раза быстрее по сравнению со средней по планете за последние 100 лет [2].

Границы природных зон остаются неизменными лишь до тех пор, пока климатическое воздействие не превысит некоторого критического уровня, который специфичен для каждого биома. Если в результате воздействия меняются доминантные для данного региона виды и возникает новый биом, то уровень воздействия следует считать критическим. В этом случае из-за гистерезиса для возврата в прежнее состояние недостаточно возврата климатических характеристик к их исходным значениям [6].

При изменении климата исследования границ биомов и входящих в них экологических систем стали частью развития современной экологии. Обнаружение и классификация изменений биомов, их границ и составляющих их экосистем является важной задачей для оценки как глобальных, так и пространственно локализованных изменений. Для оценки состояния экосистем и смещения границ природно-климатических зон (биомов) необходим мониторинг и усовершенствование методов их определения.

Целью настоящего исследования являлся анализ многолетних временных рядов вегетационного индекса NDVI (данные космической съемки по территории Евразии) для определения границы биомов. Для достижения этой цели использовался разработанный авторами метод скользящей дисперсии NDVI [7].

Материалы и методы исследования

Для отслеживания динамики растительного покрова используются вегетационные индексы, среди которых наиболее распространен нормализованный дифференциальный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), который основан на отражении и поглощении растительностью электромагнитного излучения в красном и ближнем инфракрасном диапазонах. NDVI – простой показатель количества фотосинтетически активной биомассы и универсальный индикатор как сезонной, так и многолетней динамики продуктивности растительности (30). Ниже приведена формула расчета индекса NDVI для спутниковых снимков разных сенсоров.

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

NIR – процент отраженной радиации в ближнем инфракрасном диапазоне (Near Infra-Red): 0,7–1,0 мкм;
RED – процент отраженной радиации в красном диапазоне (Red): 0,6–0,7 мкм.

В работе использовались данные AVHRR/NOAA GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies) за период с 1982 по 2006 г. с геометрической коррекцией, атмосферной коррекцией и учетом других эффектов, не связанных с изменениями вегетации. Данные доступны в виде 16-дневных композитных изображений с разрешением 8 км (на линии экватора), масштаб глобальный. Для декомпозиции временных рядов был выбран метод STL (Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess) – процедура сезонно трендовой декомпозиции, основанная на Loess. Метод STL основан на фильтрации исходных данных для разложения сезонных временных рядов на три компоненты: сезонную, трендовую и остаточную (шум): $D_i = T_i + S_i + N_i$, где D – значения временного ряда; T – трендовая составляющая ряда; S – сезонная составляющая ряда; N – остаточная составляющая ряда; i – шаг по времени. Сущность метода состоит в последовательном применении данных временного ряда Loess-сглаживаний (Loess smoother) [7].

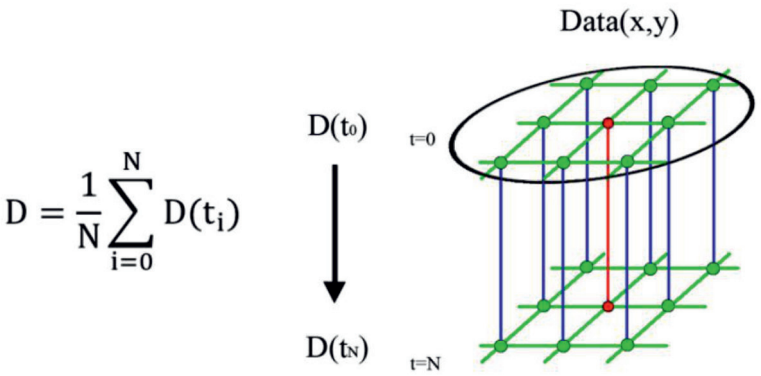

Рис. 1. Схема получения данных по дисперсии в скользящем по пространству и времени окне. D – дисперсия; x, y – координаты точки; t – время

Метод скользящего окна дисперсии был впервые применен к «длинным» рядам NDVI, что дает возможность работать с большой выборкой данных и повысить достоверность полученных результатов.

Результаты исследования и их обсуждение

На основе многолетних космических данных (1982–2006 гг.) и метода скользящего окна дисперсии построена растровая карта пространственного распределения NDVI по их среднесезонным значениям на территории Евразии. Выявлены зоны с одинаковым типом растительности, то есть принадлежащим к определенному биому.

На растровой карте (рис. 2) зеленым цветом показаны области со сходной сезонной динамикой NDVI и с низкими значениями ее дисперсии.

Переходные зоны – экотоны, в которых повышена дисперсия NDVI, на карте показаны красными линиями и точками. На рис. 2 видна неоднородность дисперсий рядов NDVI (растительности суши), отражающих границы различных природных зон (биомов). Красным цветом выделены зоны с повышенной дисперсией значений NDVI не только на границах биомов т.е. в экотонах, но также «внутри» биомов – это так называемая «экотонная мозаика» [8]**.** При исследовании экотонов в Южной Африке [8] подтверждено, что они не представлены на векторных картах растительности, а вероятностная классификация изображений, полученных дистанционным зондированием, дает такую возможность. «Экотонная мозаика» внутри биома также не может быть обнаружена на векторной карте растительности, а используемый метод дает такую возможность и на растровых картах это показано. Так, на рисунке видны 2 красные точки внутри биома – это и есть повышенная дисперсия NDVI, а на векторной карте (рис. 3) эта мозаика не просматривается.

Экотоны являются наиболее динамичными и неустойчивыми в пространстве и времени элементами ландшафтно-территориальной структуры. Именно они первыми реагируют на изменения внешних условий и поэтому являются индикаторами изменения экологического состояния экосистем. Степень неустойчивости экотонов оценивается по дисперсии NDVI – низкая, повышенная, высокая, что отражено на рис. 2. Высокая дисперсия NDVI на растровой карте изображена белым цветом, и она совпадает с горными массивами.

Развитие растительности происходит при температуре выше нуля градусов. Холдриджем [9] было введено понятие биотемпературы. Под биотемпературой понимается сумма положительных температур, в данном случае – среднемесячных. Более точное представление о связи изменений климата и растительности Северного полушария получено с сайта Climatic Research Unit (http://www.cru.uea.ac.uk/data). Climatic Research Unit предоставляет среднемесячные данные по температуре воздуха, осадкам, минимальным и максимальным температурам, а также по ряду других параметров. В данной работе были использованы данные с разрешением 0,5°×0,5°. По данным Climatic Research Unit [10] вычислены значения биотемператур и их тренды за период с 1982 по 2006 г. Пространственное распределение трендов биотемператур представлено на рис. 4.

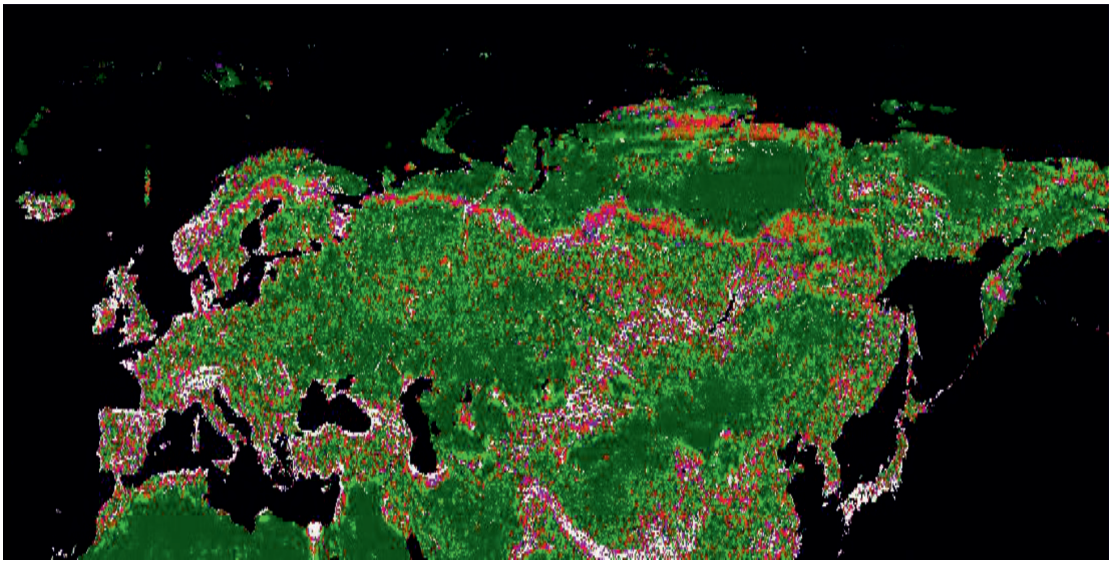

Рис. 2. Растровая карта с дисперсией рядов NDVI на территории Евразии (низкая дисперсия показана зеленым цветом, повышенная – красным, высокая – белым)

Вегетационные регионы

- Тропические и субтропические леса
- Саванна
- Пустыня
- Внутренний
- Луга
- Лес
- Тайга
- Тундра
- Горы
- Полярные и высокогорье

Рис. 3. Векторная карта природных зон Евразии

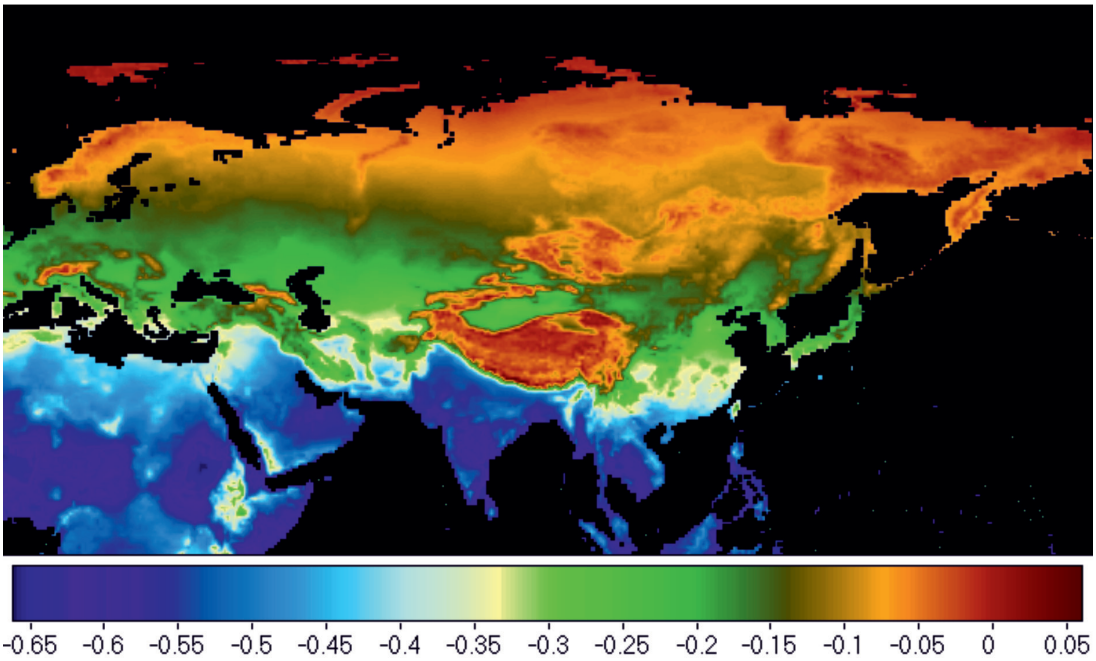

Рис. 4. Пространственное распределение биотемператур (градус в год) с 1982 по 2006 г.

Как видно из рисунка, динамика этого параметра имеет сложную пространственную структуру и в основном совпадает с зонами биомов, которые определены методом скользящей дисперсии NDVI. Температура и влажность являются доминирующим климатическим фактором в регулировании динамики активности растительности в биомах. Подтвержденное на сегодняшний день потепление составляет 0,69–0,8 °C, по сравнению с доиндустриальным уровнем на конец XIX в. [11].

В настоящее время большое внимание уделяется геоинформационному картографированию изменчивости ландшафтов и геосистем. Информационной основой изменчивости геосистем, биомов и их границ служат данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), материалы полевых исследований ландшафтов, картографические и литературные данные [12]. Экологи выделяют 4 уровня экологических нарушений. Зона нормы – растительный покров подвержен лишь разногодичной и циклической флуктуации. Зона риска – скорость изменений растительного покрова до 1–2 % площади в год. Полная смена растительного покрова происходит здесь за 50–100 лет. Зона кризиса – скорость изменений растительного покрова до 2–3 % площади в год. Полная смена растительного покрова происходит за 30–50 лет. Зона бедствия – зона экологической катастрофы. Это территории с полной потерей продуктивности, практически необратимыми нарушениями экосистем. Полная смена растительного покрова происходит менее чем за 25 лет. Деградация земель более 50 % площади. Предложенный метод дает возможность определить экологические риски. При необходимости получения оперативной информации об уровнях экологических нарушений, о возможных трансформациях геосистем и биомов при воздействии различных факторов, в том числе при климатических катаклизмах, метод скользящей дисперсии NDVI может оказаться информативным, полезным и своевременным.

Заключение

Метод скользящего окна дисперсии был нами впервые применен к «длинным» рядам NDVI, работа проводилась с большой выборкой данных, что повысило достоверность полученных результатов.

На растровой карте, построенной на основе дистанционного зондирования и метода скользящей дисперсии NDVI за длительный временной период, определено пространственное распределение NDVI применительно к различным природным зонами (биомам) Евразии. Показана возможность установки географических координат и границ биомов и экотонов, а также сдвигов этих границ в связи с изменением климатических

условий. Разработанный и апробированный метод скользящего окна дисперсии открывает новые возможности для получения фундаментальных знаний: о функционировании биосферы, о последствиях глобального потепления, об изменении границ вечной мерзлоты в глобальном масштабе. Таким образом, можно утверждать, что метод скользящей дисперсии NDVI оказался эффективным для выявления границ биомов и экотонов в глобальном масштабе.

Список литературы / References

1. 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. Vol. 11. № 9. P. 483–493. DOI: 10.1890/120312.

2. IPCC, 2014: 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 (Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland. 151 p.

3. Одум Ю. Основы экологии. М.: Мир, 1986. Т. 1. 328 с.

Odum Yu. Fundamentals of Ecology. M.: Mir, 1986. T. 1. 328 p. (in Russian).

4. Кокорин А.О. Изменение климата: обзор Пятого оценочного доклада МГЭИК. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF). 2014. 80 с.

Kokorin A.O. Climate change: review of the Fifth Assessment Report of the IPCC. M.: Vsemirnyy fond dikoy prirody (WWF). 2014. 80 p. (in Russian).

5. 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.

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. № 2. P. 48–59 (in Russian).

6. Gonsalez 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. Vol. № 19 (6). P. 755–768. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2010.00558.x.

7. 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. Vol.18. no. 7. P. 129–132.

8. De Klerk H.M., Burgess N.D., Visser V. Probabilistic description of vegetation ecotones using remote sensing. Ecological Informatics. 2018. Vol. 46. P. 125–132. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2018.06.001.

9. Holdridge L.R. Determination of world plant formations from simple climatic data. Science. 1967. Vol.105. P. 367–368.

10. Climatic Research Unit. [Electronic resource]. URL: http://www.cru.uea.ac.uk/data (date of access: 19.12.2018).

11. Haustein K., Allen M.R., Forster P.M., Otto F.L., Mitchell D.M., Matthews H.D., Frame D.J. A real-time Global Warming Index // Nature. Scientific Reports. 2017. Vol. 7. P. 1–6. DOI: 10.1038/s41598-017-14828-5.

12. Фролов А.А. Геоинформационное картографирование в исследовании изменчивости ландшафтов // Успехи современного естествознания. 2018. № 4. 167–171.

Frolov A.A. Geoinformation mapping in the study of landscape variability // Advances in current natural sciences. 2018. № 4. P. 167–171 (in Russian).