

Расчет нормализованного вегетационного индекса по данным спектральных каналов спектрорадиометра MODIS

М.Ю. Катаев^{1,2}, А.А. Бекеров³, А.К. Лукьянов^{1*}

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40

²Юргинский технологический институт (филиал)
Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ)
652055, г. Юрга, ул. Ленинградская, 26

³Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

Поступила в редакцию 27.05.2016 г.

Рассматривается подход к нормализации вегетационного индекса, рассчитываемого по измерениям спектрорадиометра MODIS. Для этих целей привлекаются дополнительные спектральные каналы спектрорадиометра, на основе которых рассчитываются облачный и снежный индексы, позволяющие построить облачную маску и выделить временные отрезки наличия облачности. Построенные модели зависимости вегетационного индекса от температуры позволяют дополнительно улучшить форму временного ряда вегетационного индекса. Приводятся результаты применения предлагаемого подхода к реальным измерениям.

Ключевые слова: вегетационный индекс, нормализация, спектрорадиометр MODIS; vegetation index, normalization, spectroradiometer MODIS.

Введение

Изучение параметров атмосферы и типов поверхности Земли с помощью данных спутниковых измерений в режиме мониторинга имеет как фундаментальное, так и прикладное значение. Необходимость охвата больших территорий, обеспечения периодичности измерений, возможность комплексирования спутниковых данных с наземными измерениями и данными других спутников ставят многочисленные задачи перед разработчиками методов обработки данных и программного обеспечения. Задачи связаны с картографированием растительного и снежного покрова, оценкой фенологических характеристик растительности и изменением их свойств во времени, выделением и анализом воздействующих на поверхность Земли факторов, получением отражательных характеристик поверхности, влажности и температуры почвы и др. Изучение параметров земной поверхности основывается на знании спектрально-отражательных характеристик разнообразных типов поверхности. Данные дистанционного зондирования позволяют получить пространственно-временную информацию о типах поверхности, на основе которой решаются задачи управления терри-

ториями, рационального природопользования, охраны окружающей среды, сельского и лесного хозяйства, МЧС и др. [1–7].

Трудности спутникового мониторинга территории поверхности Земли связаны с изменением спектрально-отражательных характеристик в зависимости от условий освещенности, состояния прозрачности атмосферы, метеорологических параметров и значительным объемом получаемых данных. Решение этих задач приводит к максимально полному учету изменения по времени и пространству метеорологических параметров при построении методов обработки, отличающихся надежностью, точностью и высокой степенью автоматизации.

Решение разнообразных практических задач спутникового мониторинга требует использования спутниковых приборов дистанционного зондирования с учетом спектральных и пространственно-временных характеристик исследуемых объектов наблюдения. Спутниковые приборы отличаются числом спектральных каналов, пространственным разрешением и временной периодичностью. Выбор того или иного прибора определяется объектом изучения и задачей мониторинга. Для мониторинга поверхности Земли применяются спутниковые приборы низкого разрешения, позволяющие с частотой от часов до нескольких дней получать глобальные данные. Мониторинг поверхности Земли приборами высокого пространственного разрешения делает

* Михаил Юрьевич Катаев (kataev.m@sibmail.com);
Артур Александрович Бекеров (artur@bekerov.ru); Андрей Кириллович Лукьянов (hyena116@mail.ru).

возможным исследование отдельных элементов поверхности, однако частота измерений при этом составляет от недели и выше.

В настоящее время наиболее информативным для мониторингового изучения атмосферы и поверхности Земли является спутниковый прибор дистанционного зондирования Terra/Aqua-MODIS. Регулярное поступление спутниковых данных и их свободное распространение позволяют наблюдать одну и ту же исследуемую территорию несколько раз в день в 36 спектральных каналах, расположенных в видимой и инфракрасной областях спектра (<http://modis.gsfc.nasa.gov>). Прибор имеет среднее пространственное разрешение в видимой области спектра и низкое в инфракрасной (500 и 1000 м).

На основе данных измерений этим спутниковым прибором разрабатываются специальные тематические продукты, которые доступны для массового использования при решении разнообразных задач. Тематические продукты содержат информацию ежедневных измерений, а также безоблачных композитов за 16 дней с различным пространственным разрешением. Наиболее часто используемые на практике данные связаны с безоблачными композитами. Возможность применения ежедневных продуктов затруднена тем, что в них максимально проявляются изменения метеорологических параметров атмосферы и особенно облачности. Данная статья показывает возможность использования нескольких спектральных каналов спектрорадиометра MODIS для получения нормализованного вегетационного индекса, освобожденного от влияния указанных выше проблем.

Постановка задачи

Спутниковые данные косвенно связаны с параметрами атмосферы и поверхности, поэтому необходима разработка соответствующих методов и алгоритмов их оценки. Для спектральных каналов спектрорадиометра MODIS видимой области спектра сигнал в упрощенном виде записывается как [8]:

$$I(\lambda, \varphi_s, \varphi_v) = I_o(\lambda) F_r(\varphi_s, \varphi_v) \rho(\lambda) \tau(\lambda, \varphi_s, \varphi_v) + I_{sc}(\lambda, \varphi_s, \varphi_v), \quad (1)$$

где F_r — функция, описывающая характеристики рельефа [9]; ρ — суммарное спектральное отражение различными типами поверхности, находящимися в пикселе; τ — спектральная прозрачность столба атмосферы; I_o — внеатмосферный солнечный спектр; I_{sc} — рассеянное в атмосфере солнечное излучение, попадающее в поле зрения спутникового прибора; φ_s , φ_v — зенитный угол Солнца и визирования спутником.

Для выделения типов поверхности применяют индексы, рассчитываемые по определенным спектральным каналам. Одним из наиболее распространенных в практических приложениях индексов является вегетационный индекс, показывающий вклад

отраженного растительностью излучения в общем сигнале, регистрируемом спутниковым прибором. Отличительную особенность такого типа поверхности как растительность составляют ее спектрально-отражательные свойства, зависящие от структуры, водности листа и наличия хлорофилла. Слабое поглощение солнечного излучения в синей и зеленой областях спектра и сильное в красном участке спектра определяют возможность выделения растительности по спутниковым сигналам, расположенным в соответствующих участках спектра. Однако, в силу наличия в момент спутниковых измерений дымки, облаков, теней, снега, значительная часть спутниковых данных является непригодной для выделения растительности (рис. 1), что проявляется в высокой степени изменения величины индекса. Кроме того, учитывая свойства растений, на величине спектрального коэффициента отражения растения сказываются перепады температуры и влажности, что также приводит к значительным вариациям величины вегетационного индекса. Выходом из этой ситуации является создание осредненных по многодневным измерениям рядов (от нескольких недель до месяца), которые называются композитными изображениями. Использование композитных изображений возможно для решения задач на промежутке времени несколько лет, а для более коротких по времени процессов эти данные слабо применимы. Другим вариантом является применение методов сглаживания временных рядов, однако при этом могут быть потеряны физические особенности изменения вегетационного индекса.

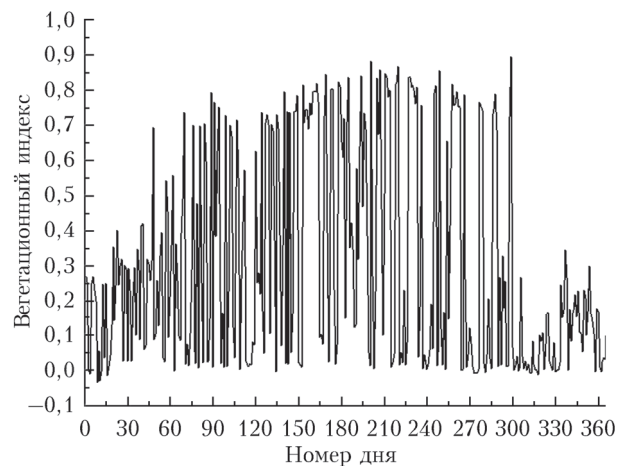


Рис. 1. Изменение величины вегетационного индекса в течение года

Вместе с тем потребность в качественных ежедневных данных наблюдения за поверхностью Земли вызывает необходимость разработки методов нормализации рядов наблюдений вегетационного индекса, не зависящих от влияния указанных выше мешающих факторов.

На рис. 1 показано изменение величины вегетационного индекса в течение года, полученного по данным измерений спектрорадиометром MODIS без учета мешающих факторов. Видно, что наблюдаются

значительные перепады значений вегетационного индекса и определяются они более состоянием атмосферы и метеорологическими параметрами, чем изменением самого типа поверхности. Применение временных рядов вегетационного индекса связано с решениями таких задач, как классификация типов поверхности или поиск изменений, где необходимо получение статистических характеристик, решение регрессионных уравнений и др. Получение статистических характеристик от функции, показанной на рис. 1, будет приводить к смещенным значениям, которые будут отличаться от истинных значений. Задачей работы является разработка подхода к нормализации с учетом температуры поверхности, позволяющего получить существенно более гладкую кривую годового цикла вегетационного индекса.

Предлагаемый подход к решению задачи

В данной работе рассматривались ежедневные тематические продукты спектрорадиометра MODIS MOD09, для которых выполнены атмосферная коррекция и географическая привязка данных, что позволяет использовать их для анализа временных рядов вегетационного индекса с точностью до отдельного пикселя. Для получения информации об углах визирования и положении Солнца были использованы данные тематического продукта MOD09GA (https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table). Данными тематических продуктов являются изображения, где каждый пиксель содержит значения отраженного солнечного излучения от поверхности с пространственным разрешением 250 м MOD09GQ/MYD09GQ и 500 м MOD09GA/MYD09GA для спутниковых приборов Terra/Aqua. Температура поверхности бралась из тематического продукта MOD11A1/MYD11A1 с пространственным разрешением 1000 м.

Нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) рассчитывается по данным первого

(Ch1) и второго (Ch2) спектральных каналов спектрорадиометра MODIS [10]:

$$NDVI = \frac{Ch2 - Ch1}{Ch2 + Ch1} \quad (2)$$

Отметим, что рассчитанный таким образом вегетационный индекс однозначно совпадает со значениями NDVI, приведенными в тематическом продукте MOD13Q1/MYD13Q1.

Нормализованный разностный индекс снега (NDSI) рассчитывается по данным четвертого (Ch4) и шестого (Ch6) спектральных каналов спектрорадиометра MODIS [11]:

$$NDSI = \frac{Ch4 - Ch6}{Ch4 + Ch6} \quad (3)$$

Маска на основе индекса NDSI строится так [12]: если $NDSI > 0,4$, то принимается, что данный пиксель содержит снег или лед, иначе этот пиксель считается свободным от облачности, снега и льда.

Нормализованный разностный индекс облачности (NDCI) рассчитывается по данным первого (Ch1) и шестого (Ch6) спектральных каналов спектрорадиометра MODIS [13]:

$$NDCI = \frac{Ch1 - Ch6}{Ch1 + Ch6} \quad (4)$$

Получаемые величины индекса облачности NDCI по формуле (4) принимают три типа значений [13]: отрицательные, положительные и близкие к нулю. Положительные значения принимаются за облачность, близкие к нулю — за поверхность, меньше нуля — за растительность. Эта классификация позволяет уточнить маску, которая получается на основе индекса снега NDSI (уменьшить число пикселей, принадлежащих к классу содержащих облачность, снег или лед).

С целью минимизации влияния мешающих параметров (облачность и изменение температуры) был разработан подход, суть которого приведена на рис. 2.

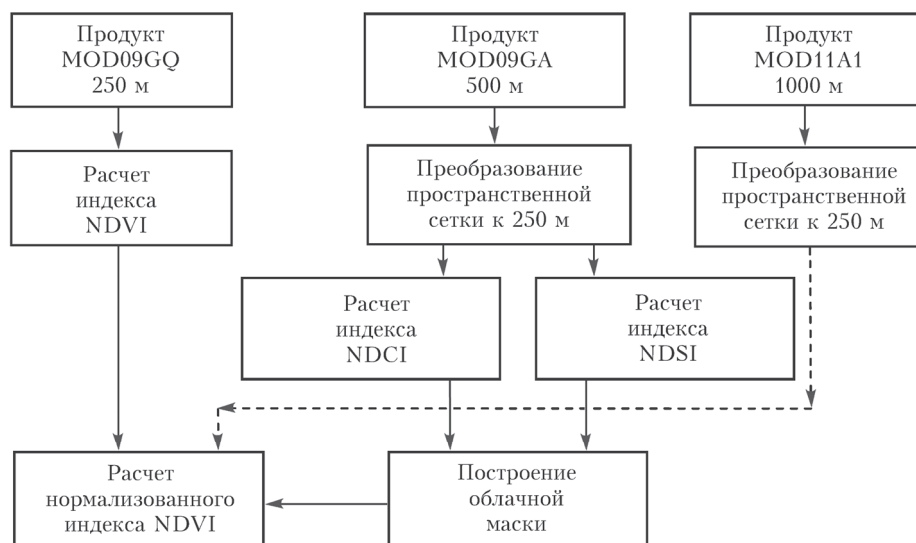


Рис. 2. Модульная структура подхода к построению нормализованного вегетационного индекса

Основой подхода является использование индексов NDSI и NDCI для построения и выделения на спутниковом изображении маски облачности, снега, льда. Маска представляет собой двоичное описание каждого пикселя изображения (0 – поверхность Земли, свободная от облачности, 1 – занятая облачностью).

Из рис. 2 видно, что алгоритм построения временного ряда нормализованного вегетационного индекса включает в себя несколько последовательных шагов. Первый шаг сопровождается переводом данных с большим пространственным разрешением на первичную сетку, равную 250 м. На втором шаге для первичной сетки проводится расчет вегетационного индекса. На третьем шаге по значениям индексов NDSI и NDCI строится облачная маска. На четвертом, последнем, шаге с учетом облачной маски и температуры выполняется нормализация значений вегетационного индекса.

Учет температурной зависимости осуществляется с помощью модели линейной регрессии, построенной на зависимости вегетационного индекса от температуры, показанной на рис. 3.

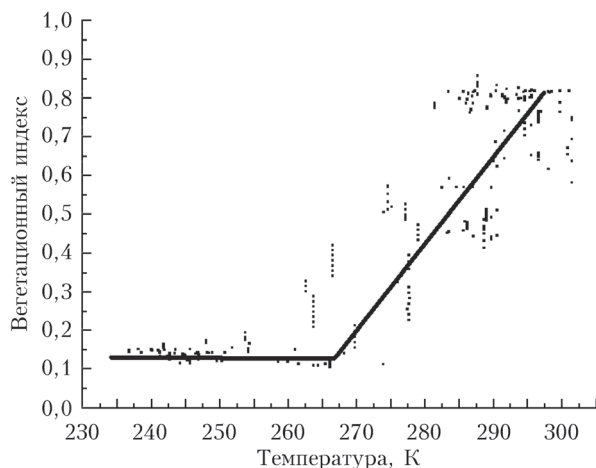


Рис. 3. Зависимость вегетационного индекса от температуры

Для расчета температурной зависимости вегетационного индекса были выбраны пиксели, свободные от облачности, для которых рассчитан вегетационный индекс и известна температура поверхности по данным продукта MOD11A1. Далее построена регрессионная зависимость, представленная на рис. 3. Видно, что в минусовой области температур значения вегетационного индекса стремятся к нулю и получают большие значения только в положительной области температур. Угол наклона линии регрессии достаточно большой, что говорит о высокой скорости развития и гибели растительности.

Результаты применения предлагаемого подхода

Учитывая подход, показанный на рис. 2, нами выполнены расчеты по нормализации значений вегетационного индекса для территории в районе

г. Томска. Для расчетов использовалась разрабатываемая нами интернет-информационная система накопления, обработки и анализа спутниковых данных MODIS [14]. Результаты нормализации годового цикла вегетационного индекса приведены на рис. 4.

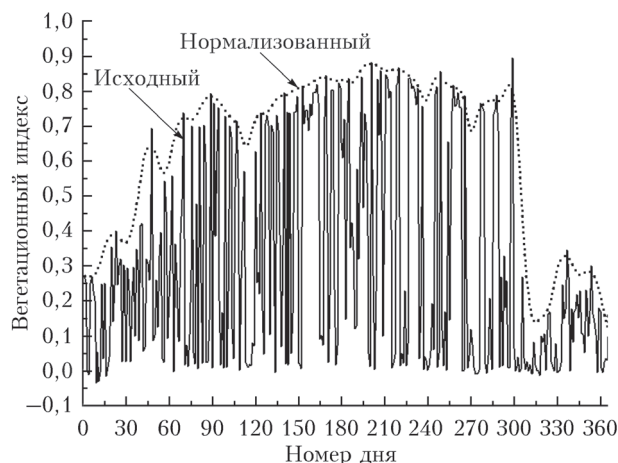


Рис. 4. Сравнение исходного и нормализованного вегетационных индексов

Видно, что предлагаемый подход позволил убрать все короткопериодные изменения вегетационного индекса, а более длительные по времени остались. Характеристики оставшихся особенностей (амплитуда, время появления и др.) временного ряда вегетационного индекса для разного типа поверхности являются предметом последующего тщательного изучения. Итог работы заключается в формировании временного ряда значений вегетационного индекса, которые могут быть положены в основу высокоточных моделей фенологического цикла различного типа растений и использоваться при решении задач лесного и сельского хозяйства.

Заключение

Рассмотрен подход, позволяющий на основе спектральных каналов спектрорадиометра MODIS провести нормализацию вегетационного индекса. Для нормализации выполняется расчет облачной маски на основе индексов облачности и снега. Найдена регрессионная зависимость вегетационного индекса от температуры. С учетом этой зависимости проводится нормализация временного хода вегетационного индекса. Приведены результаты использования предлагаемого подхода для нормализации годового цикла вегетационного индекса.

1. Белов В.В. От физических основ, теории и моделирования к тематической обработке спутниковых изображений. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2005. 265 с.
2. Сухих В.И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 392 с.
3. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 582 с.

4. Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Леженин Ю.А. Дистанционный мониторинг городских лесов // Вестн. Поволжского гос. технологического ун-та. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2015. № 1(25). С. 5–21.
5. Любимов А.В., Ксенофонтов Н.И., Колесников Ю.И. Дешифрирование и интерпретация материалов аэрокосмических съемок для совершенствования инвентаризации особо охраняемых лесов: учеб. пособие. СПб.: СПбЛТА, 2001. 192 с.
6. Толтин В.А., Барталев С.А., Бурцев М.А., Ефремов В.Ю., Луян Е.А., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Прошин А.А., Флитман Е.В. Оценка состояния сельскохозяйственных культур на основе межгодовой динамики с использованием данных MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 2, вып. 4. С. 380–389.
7. Катаев М.Ю., Бекеров А.А. Обнаружение экологических изменений природной среды по данным спутниковых измерений // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 7. С. 652–656.
8. Liang S., Strahler A.H., Walthall C.W. Retrieval of land surface albedo from satellite observations: A simulation study // J. Appl. Meteorol. 1999. V. 38, N 6. P. 712–725.
9. Ineichen P., Guisan O., Perez R. Ground-reflected radiation and albedo // Solar Energy. 1990. V. 44(4). P. 207–214.
10. Gutman G., Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/ AVHRR data for use in numerical weather prediction model // Int. J. Remote Sens. 1998. V. 19(8). P. 1533–1543.
11. Hall D.K., Riggs G.A., Salomonson V.V., DeGirolo N.E., Bayr K.J., Jin J.M. MODIS Snow-cover products // Remote Sens. Environ. 2002. V. 83, N 1. P. 181–194.
12. Sirguey P., Mathieu R., Arnaud Y. Subpixel monitoring of the seasonal snow cover with MODIS at 250 m spatial resolution in the Southern Alps of New Zealand: Methodology and accuracy assessment // Remote Sens. Environ. 2009. V. 113, N 1. P. 160–181.
13. Li W., Fang Y., Dian J., Guo M. Cloud Detection in MODIS data based on spectrum analysis // Geomatics and Information Science of Wuhan University. 2005. V. 30(5). P. 435–438.
14. Катаев М.Ю., Бекеров А.А., Лукьянов А.К. Интернет-информационная система накопления, обработки и анализа спутниковых данных MODIS // Докл. ТУСУРа. 2015. № 1(35). С. 93–99.

М.Ю. Катаев, А.А. Бекеров, А.К. Лукьянов. **Calculation of normalized vegetation index from spectral channels of spectral radiometer MODIS.**

The approach to normalization of the vegetation index calculated from measurements of the spectroradiometer MODIS is discussed in the paper. To do this, the normalization involves additional spectral channels of a spectroradiometer, based on the calculated cloud and snow indices allowing one to build a cloud mask and to allocate time periods of the presence of clouds. The built model for vegetation index dependency on the temperature allows further improvement of the form of time series of the vegetation index. The results of the application of the proposed approach to the real measurements are discussed in the paper.