

## Обнаружение экологических изменений природной среды по данным спутниковых измерений

М.Ю. Катаев<sup>1,2</sup>, А.А. Бекеров<sup>3\*</sup>

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

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

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

Поступила в редакцию 3.03.2014 г.

Основными направлениями экологического контроля территории из космоса являются разработка методов дистанционного зондирования параметров поверхности Земли и атмосферы и проведение мониторинга состояния окружающей среды. Данные мониторинга необходимы для исследования природных процессов и анализа воздействий естественных и антропогенных факторов на природную среду. Для получения, обработки и анализа данных дистанционного спутникового мониторинга необходимо создание соответствующего программного обеспечения. Рассматриваются результаты, полученные с помощью программной системы при обработке спутниковых данных спектрометра MODIS – рассчитанные вегетационные индексы и анализ их пространственно-временного поведения. На основе статистических данных выделяется зависимость естественных вариаций индексов во времени, что позволяет обнаружить изменения вариаций за счет антропогенных воздействий.

*Ключевые слова:* экология, методика, спутниковые данные, вегетационные индексы; ecology, methodology, satellite data, vegetation indexes.

### Введение

В настоящее время в мире находят широкое применение методы и технологии обработки данных дистанционного зондирования для различных теоретических научных и практических приложений [1–4]. Одним из направлений дистанционного зондирования является экологический контроль опасных территорий, городов, дорог и др. К особенностям дистанционного зондирования земного покрова и атмосферы на одной и той же территории можно отнести сильные вариации характеристик измеряемого сигнала в спектральной области в различное время суток и в течение года. Для обеспечения возможности спутникового мониторинга необходимо создание технологий, отличающихся высокой степенью автоматизации и использованием унифицированных алгоритмов обработки и анализа данных мониторинга, учитывающих высокую изменчивость спектральных характеристик различных типов поверхности, а значит, и спутникового сигнала. Это обстоятельство используется нами для диагностики экологической ситуации в заданном районе.

Решение задач экологического мониторинга [5, 6] требует привлечения спутниковых систем дистанци-

онного зондирования, исходя из характеристик объектов наблюдения, а именно их пространственных размеров, структуры рельефа, типов поверхности и особенностей временной динамики и спектральных свойств.

Целью настоящей работы является разработка программной системы выявления изменений экологической ситуации на определенной исследуемой территории по данным обработки пространственно-временных спектральных спутниковых данных. Такая система должна наглядно отображать, анализировать актуальную информацию об антропогенном воздействии человека на окружающую среду и выявлять изменения в экосистеме. Мы предлагаем использовать алгоритм выявления изменений (change detection) в информации, получаемой на основе преобразования спутниковых данных. В отличие от существующих подходов к поиску изменений при обработке спутниковых измерений, мы применяем алгоритм обнаружения разладки процесса [7].

### Спутниковый экологический мониторинг

Экологический мониторинг связан с наблюдениями за состоянием окружающей среды, оценкой и прогнозом изменений состояния под воздействием

\* Михаил Юрьевич Катаев (kataev.m@sibmail.com); Артур Александрович Бекеров.

естественных и антропогенных факторов. При наблюдении за большой территорией, например за районом добычи нефти или угля, возникает необходимость постоянного ее мониторинга, что невозможно сделать наземными или самолетными методами. Только спутниковый мониторинг позволяет охватить всю исследуемую территорию регулярными измерениями.

Наиболее часто применяемым методом решения задач исследования поверхности Земли из космоса является тематический анализ изображений, получаемых спутниковыми приборами в различных спектральных диапазонах. На орбите Земли находится большое количество спутников, которые участвуют в измерениях земной поверхности и атмосферы. Последовательно выполняют съемку всего земного шара такие спутники, как Terra/Aqua, SPOT 4/5, EROS A/B, Landsat, ENVISAT-1 и многие другие.

В данной работе используются снимки спектро-радиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer <http://modis.gsfc.nasa.gov/>), который установлен на спутниках Aqua и Terra (пространственное разрешение 250, 500 и 1 км в зависимости от спектрального канала).

## Описание методики

Нами предлагается считать спутниковые сигналы (каналы видимого диапазона спектра и ближнего инфракрасного) прибора MODIS для исследуемой территории. Каждый пиксель изображения территории в том или ином канале MODIS является основой для расчета вегетационных индексов (Normalized Difference Vegetation Index, Simple Ratio Index, Enhanced Vegetation Index, Atmospherically Resistant Vegetation Index, Sum Green Index и др.) [8]. Перед тем как рассчитать вегетационные индексы, данные измерений подвергаются коррекции на учет солнечной составляющей, зенитного угла Солнца и угла визирования спутника [9, 10].

За время измерений, которое может достигать нескольких лет, образуются временные ряды изменений вегетационных индексов. Анализ временных рядов разделяется на основные виды: анализ типа и параметров распределения, анализ трендов, анализ выбросов и анализ изменений. Анализ типа распределения показывает основные статистические особенности вариации индекса в данной географической точке, возникающие вследствие естественных и антропогенных причин, анализ трендов имеет значение при изучении долгосрочных изменений вариаций индексов, а исследование выбросов важно для анализа предельных состояний среды. Изучая закономерности изменения временных рядов, можно построить алгоритм, выделяющий антропогенные нарушения на фоне естественных процессов.

Для целей экологического контроля предлагается использовать вероятностный метод диагностики, который сводится к решению задачи обнаружения изменения статистических свойств случайного процесса. Основой подхода является алгоритм куму-

лятивных сумм, который заключается в построении процедуры оптимального обнаружения момента и величины разладки временного ряда [7].

## Описание программного комплекса

Природные изменения зависят от многих факторов, которые связаны с рельефом, колебаниями температуры, давления, изменений газового состава и др. Это предъявляет особые требования к разработке системы обработки и анализа спутниковых данных. Необходимо организовать унифицированный интерфейс доступа к данным в разных источниках, которые имеют, как правило, разные форматы хранения.

По результатам анализа существующих методов оценки состояния поверхности Земли нами было решено использовать разнообразные индексы, рассчитываемые на основе спектральных каналов прибора MODIS: нормализованный разностный вегетационный индекс – NDVI, коротковолновый вегетационный индекс – SWVI, инфракрасный вегетационный индекс, разностный вегетационный индекс, трансформированный вегетационный индекс и др., чувствительные к изменению состояния поверхности Земли и растительности. Приведем некоторые формулы вегетационных индексов, которые рассчитываются на основе спектральных каналов спектро-радиометра MODIS:

$$\text{NDVI} = \frac{R_{0,85} - R_{0,65}}{R_{0,85} + R_{0,65}}, \quad \text{SWVI} = \frac{R_{0,85} - R_{1,65}}{R_{0,85} + R_{1,65}},$$

$$\text{IPVI} = \frac{\text{NDVI} + 1}{2}, \quad \text{TVI} = \sqrt{\text{NDVI} + \frac{1}{2}},$$

где  $R_{0,65}$ ,  $R_{0,85}$  и  $R_{1,65}$  – спектральные каналы композитного изображения MODIS, соответствующие 650-, 850- и 1650-нм диапазонам спектра.

Большая часть изменений индекса NDVI во времени для заданной пространственной точки определяется естественными причинами. В определенные редкие моменты времени эти изменения формируются за счет иных причин, которые можно отнести к категории нарушающих экологию (пожар, вырубка леса и др.). Нами предлагается подход обнаружения особенностей поведения вегетационных индексов во времени, в основе которого лежат получаемые со спутника данные и априорная информация, содержащаяся в научных базах данных NCEP [11].

Программа разрабатывается как web-ГИС-система и включает такие блоки, как подсистема сбора и предварительной обработки спутниковых данных, подсистема тематического анализа спутниковых данных и подсистема анализа данных и генерация отчетов (графических и табличных). Основные информационные потоки в программной системе контроля экологического состояния территории, реализуемой в форме web-ГИС-системы [12], представлены на рис. 1.

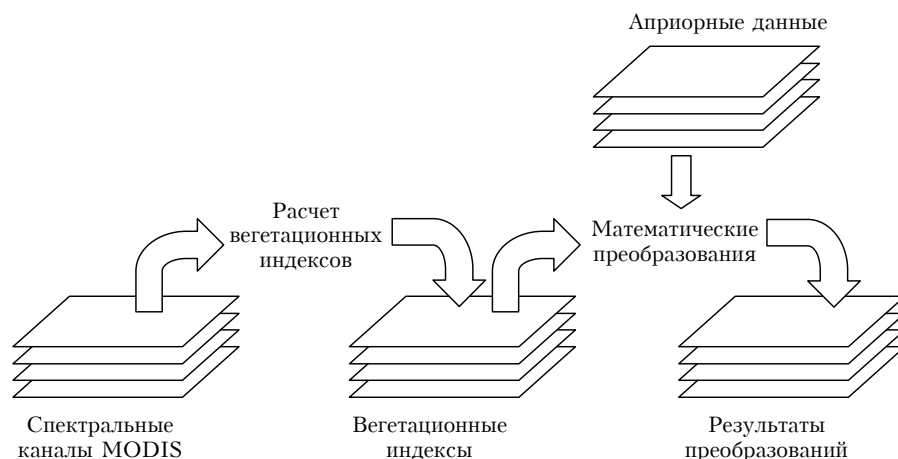
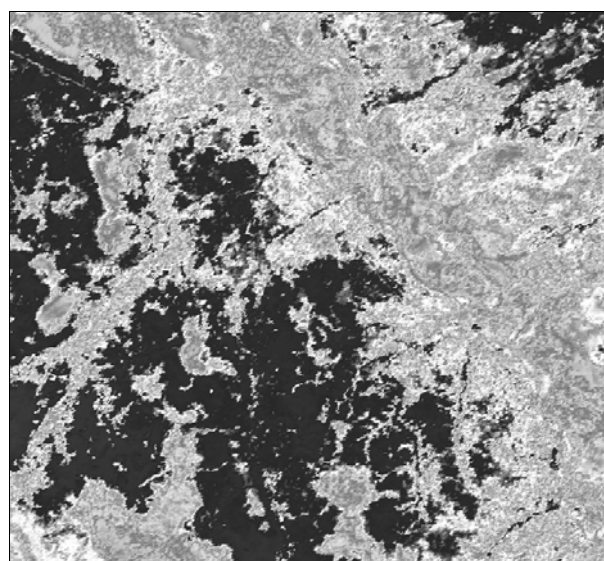


Рис. 1. Информационные потоки в web-ГИС-системе контроля экологического состояния территории

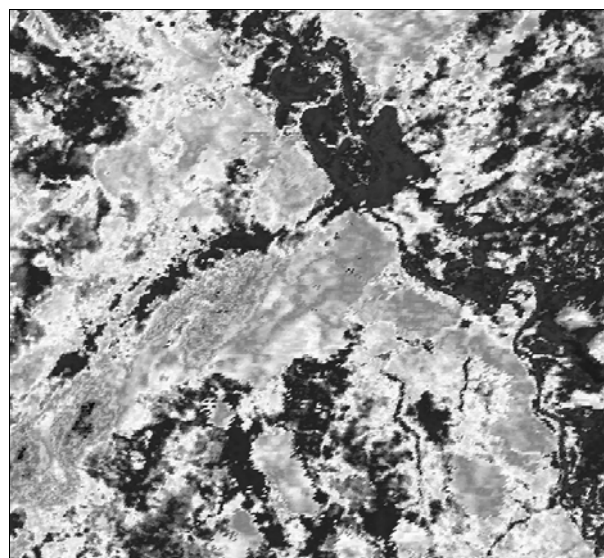
Информационные потоки (рис. 1) связаны с преобразованием спектральных каналов прибора MODIS для некоторой территории размером  $M \times N$  пикселей в набор вегетационных индексов (NDVI, SWVI, IPVI и др.). Далее набор вегетационных индексов подвергается математическим преобразованиям (статистика, корреляционный анализ, факторный анализ, кластеризация, wavelet и др.). Одним из элементов статистики, который мы используем в задаче, является оценка закона распределения и его основных параметров изменения того или иного индекса. Также нами используются наборы априорной информации для той же территории (температура воздуха и почвы, осадки, рельеф, освещенность Солнцем, влажность и др.), которая нужна для выявления особенностей естественного хода изменения индексов. Выявленные факторы, определяющие естественный ход индексов, позволяют идентифицировать любое изменение, придав ему характеристику: естественный или антропогенный.

## Результаты расчетов

На рис. 2 приведены примеры расчета вегетационного индекса NDVI для территории Томской области в летнее и зимнее время. Значения индекса NDVI нами переводились из типичных значений диапазона (0–1) в диапазон яркостей (0–255) для более удобного графического представления. Хорошо видно, что вегетационные индексы весьма чувствительны к температурным изменениям на определенной территории. Именно это обстоятельство и используется нами для выявления изменений (change detection), которые классифицируются по двум вышеуказанным состояниям. Однако среди множества всех изменений могут присутствовать только естественные, обусловленные природными факторами (изменение температуры, давления, влажности и др.). Разумеется, что антропогенные изменения можно обнаружить лишь тогда, когда их временные статистические показатели отличаются от естественных вариаций.



Лето



Зима

Рис. 2. Пример расчета вегетационного индекса NDVI для территории Томской области в один из дней лета и зимы 2010 г.

Каждый пиксель изображения, показанного на рис. 2, представляет собой элемент вектора, значения которого показаны на рис. 3.

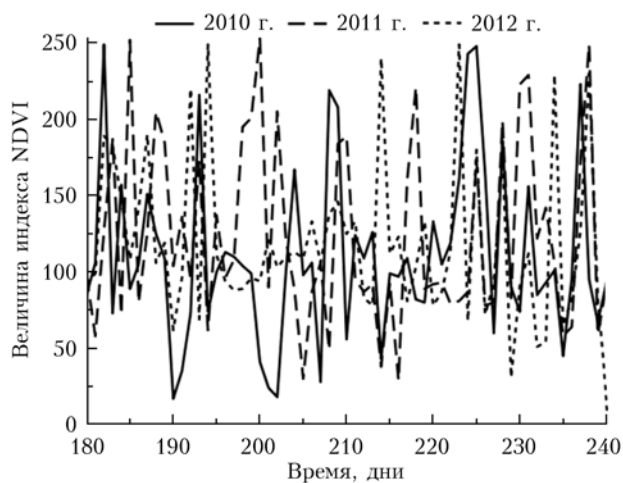


Рис. 3. Индекс NDVI для одного из исследуемых пикселей территории Томской области в течение июля 2010–2012 гг.

Хорошо видно, что для одной и той же географической точки значения индекса NDVI (для других, нами рассчитанных индексов, наблюдается такой же эффект) отличаются год от года. В июле 2012 г. были аномальные изменения природных условий, которые смещали значения индекса NDVI, но незаметны при исследовании абсолютных значений индекса. Для того чтобы сделать статистические выводы об отклонении вегетационных индексов в течение определенного периода, нами рассчитывались гистограммы изменения величины индекса NDVI (рис. 4) (соответствующего рис. 3) в течение июля 2010 и 2012 гг.

Оказалось, что, несмотря на существенные вариации значений вегетационного индекса (см. рис. 3), гистограммы получаются весьма схожими по параметрам, когда изменения определяются естественными причинами. И только особые условия, которые нарушают естественный ход поведения индекса NDVI, могут привести к изменению гистограммы. Отличие гистограмм за июль 2010 и 2012 гг. связано с существенными изменениями в природной среде за счет значительных смещений в температурном режиме и большого задымления в течение 2 мес. Отметим еще раз, что этих изменений прямо не наблюдается при анализе отклонений индекса NDVI (см. рис. 3).

Приведенный на рис. 4 пример показывает изменения гистограммы, которые были обнаружены алгоритмом обнаружения разладки случайного процесса [7]. Входом алгоритма является вектор значений NDVI, а выходом — обозначение временного отрезка, для которого происходит нарушение статистического закона поведения (среднее и дисперсия). Таким образом, этот алгоритм позволяет отслеживать отклонения в законе распределения вегетационного индекса при появлении нового значения измерений, статистические свойства которого отли-

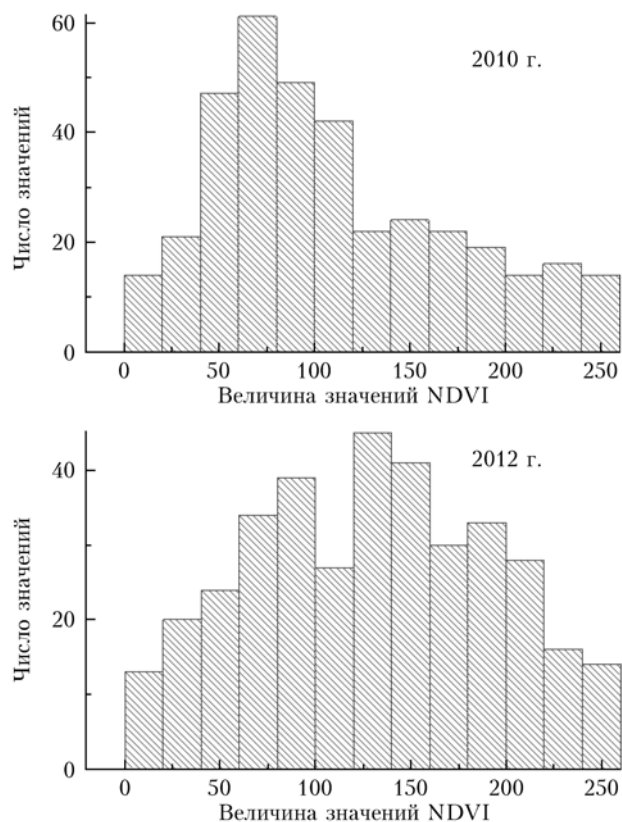


Рис. 4. Гистограмма распределения значений индексов NDVI в течение июля 2010 и 2012 гг. для одного и того же пикселя

чаются от определяемых лишь естественной составляющей. Оценка чувствительности данного подхода к величине изменения индекса NDVI и приводящих к этому условий будет обсуждаться в последующих статьях.

## Заключение

В статье приводится описание разрабатываемой нами программной системы для обнаружения изменений экологической составляющей исследуемой территории на основе обработки спутниковых данных спектрометра MODIS. К основным результатам работы можно отнести следующее.

1. Проведено накопление спутниковых данных за период 2009–2012 гг. для территории Томской области, и выполнен расчет вегетационного индекса NDVI.

2. Для каждой точки исследуемого пространства определена оценка распределения временного поведения индекса.

3. Найдены статистические характеристики поведения индекса, которые отвечают естественным условиям.

4. Выполнена статистическая оценка качества работы алгоритма обнаружения разладки случайного процесса на примере аномальных условий лета 2012 г. Алгоритм четко зафиксировал изменения статистических свойств процесса годового изменения индекса NDVI.

Для дальнейшего развития и определения чувствительности подхода нами планируется обнаружение экологических условий меньшего масштаба по времени и пространству.

1. *Кашкин В.Б., Сухинин А.И.* Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М.: Логос, 2001. 322 с.
2. *Гарбук С.В., Гершензон В.Е.* Космические системы дистанционного зондирования Земли. М.: Издательство А и Б, 1997. 297 с.
3. *Чандра А.М., Гош С.К.* Дистанционное зондирование и географические информационные системы. М.: Техносфера, 2008. 312 с.
4. *Виноградов Б.В.* Аэрокосмический мониторинг экосистем. М.: Наука, 1984. 320 с.
5. *Кудашев Е.Б., Мясников В.П., Сюттюренко О.В., Тущенко Ю.Г.* Инновационная программа интеграции российских спутниковых данных экологического мониторинга // Вестн. РФФИ. 2003. № 1(31). С. 48–58.
6. *Козодеров В.В., Косолатов В.С.* Модели оценки состояния почв и растительности по многоспектральным спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 1993. № 5. С. 40–57.
7. *Козинев И.А., Мальцев Г.Н.* Модифицированный алгоритм обнаружения разладки случайного процесса и его применение при обработке многоспектральных данных // Информационно-управляющие системы. СПб.: СПбГУАП. 2012. Т. 3, № 58. С. 9–17.
8. *Черепанов А.С., Дружинина Е.Г.* Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геомадика. 2009. № 3. С. 28–32.
9. *Головкин В.А.* Современные технологии устранения влияния атмосферы на многоспектральные измерения высокого пространственного разрешения из космоса // Исслед. Земли из космоса. 2006. № 2. С. 11–23.
10. *Энгель М.В., [Афонин С.В.], Белов В.В.* Методика предварительной оценки точности метеоданных MODIS при атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 8. С. 692–694.
11. *NCEP/NCAR Reanalysis.* URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/reanalysis.shtml>
12. *Samet R.* Web based real-time meteorological data analysis and mapping information system // Int. J. Education and Information Technologies. 2010. V. 4, iss. 4. P. 187–196.

*M.Yu. Kataev, A.A. Bekerev.* **Detection of ecological changes in the natural environment from satellite measurements.**

The main directions of the ecological control of the territory from the space are the development of methods of remote sensing of the parameters of Earth surface and atmosphere and monitoring of the state of the environment. Monitoring data are necessary for investigation of natural processes and analysis of impacts of natural and anthropogenic factors on the natural environment. For receiving, processing, and analysis of data of the satellite remote monitoring, it is necessary to create appropriate software. The article considers a program-analytical complex based on MODIS satellite data allowing counting vegetation indexes and analysis of their behavior. On the basis of statistical data, the dependence of natural variations in the indexes is determined that allows detecting changes in the variations due to anthropogenic impacts.