

УДК 528.88

НЕЛИНЕЙНЫЕ ТРЕНДЫ ЧИСТОЙ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ЮГА КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ: МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ

Ларько А.А., Иванова Ю.Д., Шевырнов А.П.

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

Работа посвящена изучению пространственного распределения нелинейных трендов чистой первичной продукции (ЧПП) растительности, полученных различными методами на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Исследование проводилось на территории юга Красноярского края, обладающего большим разнообразием природных ландшафтов от степей до высокогорных альпийских лугов Саянских гор. В работе использовались методы STL (Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess) и ССА (сингулярный спектральный анализ). Сравнение результатов, полученных с помощью этих методов, показало, что для декомпозиции временных рядов данных ДЗЗ и последующего анализа полученных трендов больше подходит метод STL. Этот метод имеет гибкие настройки и позволяет выявлять краткосрочные циклы. Метод ССА не подходит для изучения трендов на коротких временных рядах, однако может быть использован для прогнозирования.

Ключевые слова: чистая первичная продукция, нелинейные тренды, тренды, спутниковые данные, растительность, динамика

NON-LINEAR TRENDS OF PLANTS NET PRIMARY PRODUCTION IN SOUTH OF KRASNOYARSK KRAI WITH SATELLITE DATA: METHODS AND APPROACHES

Larko A.A., Ivanova Y.D., Shevyrnogov A.P.

Institute of biophysics SB RAS, Krasnoyarsk, e-mail: lantar@inbox.ru

This is a study of the spatial distribution of non-linear trend of net primary production (NPP) of vegetation obtained by different methods based on remote sensing. The study was conducted in the south of the Krasnoyarsk Territory, has a large variety of natural landscapes from the steppes to the high alpine meadows of the Sayan Mountains. We used methods of STL (Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess) and CCA (Singular Spectrum Analysis). Comparison of the results obtained by these methods has shown that the decomposition of time series of remote sensing data and further analysis of the trends is more suitable method of STL. This method has a flexible configuration and can detect short-term cycles. CCA method is not suitable for studying trends in short time series, but may be used for prediction.

Keywords: net primary production, non-linear trends, trends, satellite data, plants, dynamics

Для настоящего времени характерны крупномасштабные изменения в растительных сообществах в различных частях нашей планеты, связанные как с изменением климата, так и с широкомасштабной антропогенной деятельностью. Чистая первичная продукция является одним из показателей, который позволяет проследить изменения в растительных сообществах, в первую очередь изменения их продуктивности во времени на определенной территории. Чистая первичная продукция представляет собой количество углерода, ассимилированного зелеными растениями из атмосферы благодаря процессу фотосинтеза. Значения ЧПП отличаются как для различных растительных биомов, так и для одинаковых растительных сообществ, произрастающих в разных природных условиях. Основной сложностью при рассмотрении ЧПП является большая трудоемкость при определении его текущего значения для различных экосистем.

Существует достаточно большое количество исследований, посвященных изучению временной изменчивости продуктивности бореальных лесов с использованием данных космического зондирования [4, 5]. Однако большинство работ сосредоточено на анализе коротких временных рядов. Это период 1982–2000 гг. или ряды, начинающиеся с 2000 г. (что обусловлено запуском новых спутниковых систем). Кроме того, даже на более длительных промежутках времени (1982–2008) обычно рассматриваются линейные тренды, которые не дают объективной картины изменений. В большей части работ не рассматривается пространственное распределение динамики ЧПП или другого показателя, а оцениваются тренды, усредненные по площади. Полученные усредненные результаты при дальнейшей верификации их наземными данными зачастую очень неоднозначны. Таким образом, можно говорить о неприменимости линейных моделей для анализа временных

рядов в сложных, пространственно-распределенных системах. Поэтому возникает вопрос о проверке и анализе применимости различных методов получения временных трендов, подробное рассмотрение их особенностей, сильных и слабых сторон, применительно к данным дистанционного зондирования Земли, входящих в модели оценки ЧПП.

В данной работе оценивались нелинейные тренды чистой первичной продукции растительности с 2000 по 2012 гг. для юга Красноярского края (район бассейна реки Енисей). Общая площадь территории составляет 3000 км² (анализируемый участок размерностью 500×600 км). На данной территории находятся различные типы экосистем: степи Хакасии, лесостепи, хвойные и лиственные леса, горные территории Западного Саяна. Леса на территории района составляют 80% площади и приурочены к Саянам. На изучаемой горной территории представлены следующие высотные пояса: степной, лесостепной, черневой, таежный, субальпийский, альпийский. Таким образом, в результате исследования предполагалось получить тренды ЧПП для различных растительных сообществ на данной территории, проанализировать их особенности и протестировать пригодность для этих целей методов STL и ССА.

Материалы и методы исследования

Для определения значений ЧПП на протяженных малодоступных территориях традиционно используются данные дистанционного зондирования со спутников. Здесь расчет ЧПП основан на оптических спектральных спутниковых данных и данных о подстилающей поверхности. Для оценки чистой первичной продукции по спутниковым данным существует множество расчетных моделей, большинство из них позволяет оценить глобальные значения [1, 6]. В данной работе для расчета ЧПП была использована модель MODIS NPP (на основе данных MODIS/TERRA). Главной особенностью этой модели является использование эмпирических зависимостей при расчете ЧПП для каждого из 15 наземных биомов планеты. При расчетах фитомассы, GPP (общая первичная продукция) и дыхания используется индекс площади листовой поверхности (LAI). Функции дыхания и GPP зависят от температуры. В дополнение к дыханию зеленой фитомассы учитывается дыхание стволов (при расчете среднегодовых значений ЧПП) и дыхание корней.

Значения ЧПП были получены на основе данных сканера MODIS спутника Terra, в работе использовался продукт MOD17, пространственное разрешение 1 км². Временной ряд наблюдений с 2000 по 2012 гг. Данные представляют собой композитные изображения, временной шаг 8 дней, рассчитанные на основе модели MODIS NPP.

Первый метод, который использовался для декомпозиции временных рядов – STL Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess – процеду-

ра сезонно трендовой декомпозиции, основанная на Лессе. Метод STL основан на фильтрации исходных данных для разложения сезонных временных рядов на три компоненты: сезонную, трендовую и остаточную (шум):

$$D_i = T_i + S_i + N_i, \quad (1)$$

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 к данным временного ряда Loess-сглаживаний (Loesssmoother) [2].

Следующим нелинейным методом декомпозиции временных рядов взят метод ССА «Гусеница», в основе которого лежит сингулярный спектральный анализ данных временного ряда. Метод основан на анализе главных компонент и позволяет исследовать стационарные и нестационарные временные ряды [3]. Метод ССА «Гусеница» позволяет выделить интересные компоненты временного ряда, в частности линейный и нелинейный тренды, компоненты с заранее известным и заранее неизвестным периодом, сгладить исходные данные, сделать прогноз ряда, заполнить пропуски.

Базовый алгоритм состоит из двух этапов, разложения и восстановления. Этап разложения состоит из двух шагов. Процедура вложения переводит исходный временной ряд D размерностью N (2) в последовательность многомерных векторов X .

$$D = (f_0, f_1, \dots, f_N) \quad (2)$$

Пусть L – некоторое целое число (длина окна), $1 < L < N$. Процедура вложения образует $K = N - L + 1$ векторов вложения, имеющих размерность L .

За процедурой вложения идет сингулярное разложение матрицы ряда. Этап восстановления заключается в группировке выбранных компонент (для получения тренда выбирается самая медленная компонента). На последнем шаге базового алгоритма каждая матрица сгруппированного разложения переводится в новый ряд длины N посредством диагонального усреднения [3].

Каждый из методов имеет свои особенности, сильные и слабые стороны. Например, метод STL в зависимости от заданной степени сглаживания, способен выделять не только трендовые, но и тренд-циклические компоненты временных рядов. Эта дополнительная информация может послужить основой при анализе биологических и климатических причин таких колебаний динамики ЧПП различных экосистем, находящихся на изучаемой территории. С другой стороны, метод ССА «Гусеница» позволяет находить трендовые, циклические и другие компоненты временного ряда в виде отдельных спектральных составляющих, создавая тем самым основу для прогноза поведения временных рядов ЧПП.

Результаты исследования и их обсуждение

С помощью двух различных методов STL и ССА «Гусеница» были получены пространственно-распределенные нелинейные тренды точечных измерений чистой первичной продукции (рис. 1).

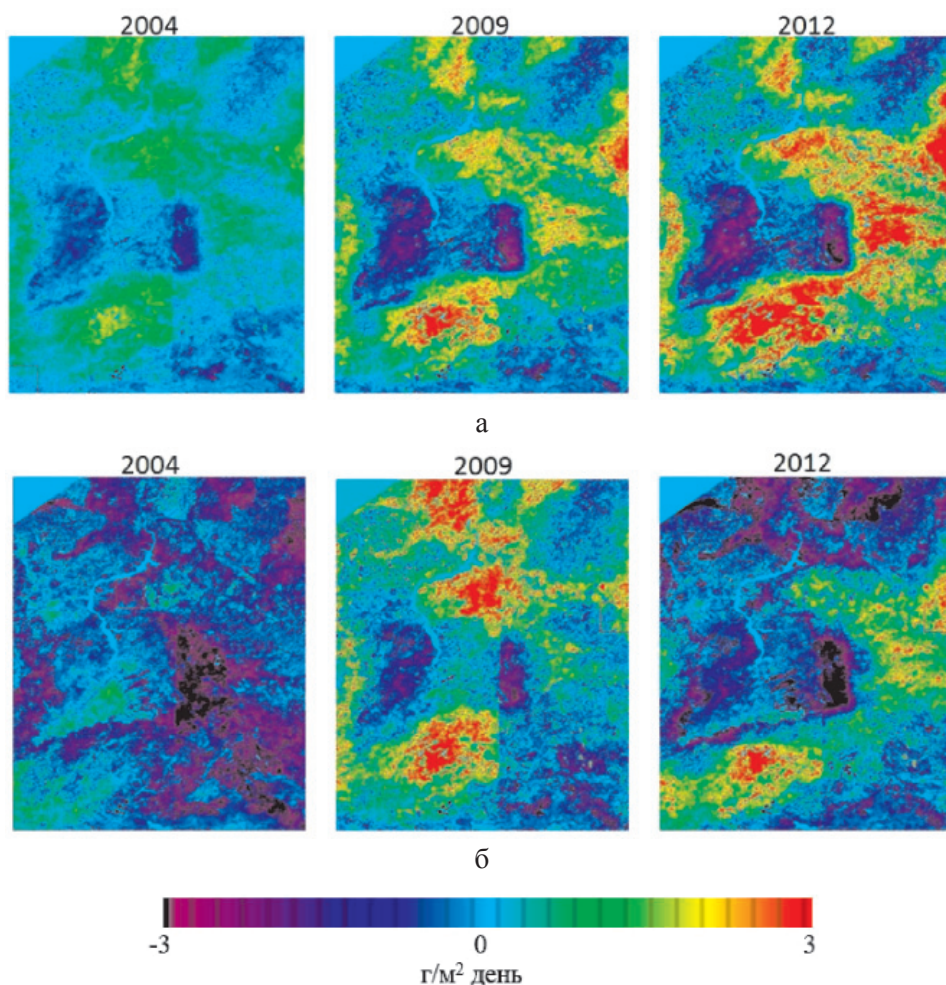


Рис. 1. Пространственное распределение значений трендов ЧПП относительно начальных значений (2000 год): а – рассчитанных методом ССА; б – рассчитанных методом STL

Метод STL имеет более гибкую настройку фильтрации шумов, что позволяет выявлять краткосрочные циклы развития трендов. К особенностям данного метода нужно отнести то, что при увеличении размеров окна фильтрации происходит сглаживание кривой, которое приводит к вырождению нелинейного тренда в линейный. В результате этого могут быть потеряны важные особенности динамики ЧПП во времени, обусловленной внешними (температурно-влажностный режим, антропогенное воздействие и др.) или внутренними причинами (возраст, породный состав древостоя, другие характеристики растительного ценоза), оказывающими влияние на будущую динамику ЧПП.

Следующим недостатком метода STL является то, что при изменении длины временного ряда значения на концах полученных кривых заметно отличаются (рис. 2). На рисунке представлены тренды, рассчитанные

методом STL для одной и той же точки но по разным временным отрезкам, ширина окна фильтрации 4 года. Таким образом, могут наблюдаться значительные, зависящие от степени сглаживания, расхождения значений на концах полученных кривых.

В процессе работы с методом – ССА «Гусеница» выяснилось, что к особенностям применяемого метода нужно отнести то, что расчет трендов значений ЧПП методом ССА на коротких временных отрезках, таких как 2000–2012 гг., показывает только линейное направление, не улавливая краткосрочные циклы (рис. 2). Следующим недостатком метода ССА является то, что для получения нелинейного тренда необходимо соблюдение специальных условий: выбор окна, равного половине временного отрезка и кратного периоду, что приводит к требованию четности по периоду для временного ряда. Иначе полученный тренд имеет большое зашумление сезонной динамикой.

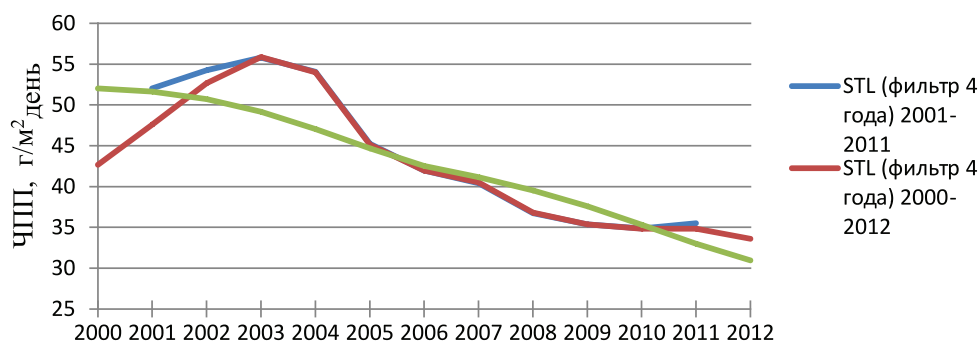


Рис. 2. Примеры нелинейных трендов ЧПП, построенных разными способами

Общая же картина поведения трендов во времени и пространстве, показанная этими методами, не имеет принципиальных различий (рис. 1).

Пространственное распределение трендов ЧПП на рассмотренной территории показало особенности временной динамики значений ЧПП для различных растительных сообществ за период времени 2000–2012 гг. Декомпозиция временных рядов ЧПП двумя методами выявила зоны уменьшения, роста и стабильного поведения ЧПП на исследуемой территории за это время (рис. 1).

Если опираться на ландшафтное распределение типов растительности изучаемой территории, можно сделать вывод, что зоны роста трендов ЧПП преимущественно соответствуют хвойным вечнозеленым лесам, зоны уменьшения расположены в смешанных и лиственных лесах, а стабильные значения присущи степным и сельскохозяйственным землям.

При анализе временной динамики рядов ЧПП за период 2000–2012 гг. с помощью метода ССА можно с уверенностью отметить общие изменения в значениях ЧПП на рассмотренной территории, произошедшие за тринадцать лет. Уменьшения значений ЧПП на данной территории произошли на равнинах и на территории предгорий Саяна. Эти площади представляют собой либо сельхозугодия, либо луговую, лесную растительность, смешанную с сельхозугодиями на территориях, простирающихся вокруг р. Енисей и не достигающих высот 300 м над уровнем моря. Именно эти районы наиболее подвержены антропогенному воздействию, и именно они страдают в первую очередь при неблагоприятных погодных условиях, таких как засухи.

Если рассматривать значения ЧПП как условный показатель, отражающий динамику бюджета углерода на рассмотренной территории за определенный период времени, без учета почвенных процессов, можно определить территории, расположенные до

300 м, как территории, которые перестали накапливать углерод в растительной биомассе с той скоростью, как это происходило 13 лет назад. Снижение аккумуляции углерода из атмосферы достигает на отдельных территориях примерно 30%. Этот процесс происходит на большей части площади сельхозугодий исследованной территории юга Красноярского края.

В основном на исследованной территории значения ЧПП остаются достаточно стабильными за рассмотренный период 2000–2012 гг. Эти территории заняты смешанными лесами с преобладанием лиственных пород и расположенных на высотах, приблизительно до 500–600 м.

Положительная динамика ЧПП за рассмотренный период времени наблюдается только на территории, занятой хвойными видами деревьев. Это горные леса Западного Саяна на высотах 600–1200 м. Данные территории не подвержены массивному антропогенному воздействию, имеют место только вырубки на ограниченных участках. Нужно отметить, что экосистемы на данных высотах более стабильны, здесь произрастают такие хвойные, как кедр и пихта, это одновозрастные леса горно-таежного пояса Западного Саяна. Именно на данных территориях происходил рост значений ЧПП за рассмотренный период времени, таким образом, по сравнению с 2000 г. здесь происходит увеличение депонирования углерода из атмосферы в процессе фотосинтеза.

Если с помощью метода ССА можно проанализировать общую направленность динамики ЧПП за рассмотренный период времени, определить области стабильности, постоянного снижения либо области постоянного повышения значений ЧПП, то с помощью метода STL возможно выделение не только общего тренда за длительный период времени, но и особенностей временной динамики ЧПП в различные годы внутри исследуемого периода времени.

В то же время если изменять ширину окна при работе методом STL, например увеличить ее до 13 лет, то получаются результаты, практически совпадающие с результатами, полученными методом ССА, показывающие общий тренд развития динамики ЧПП за период 2000–2013 гг.

Выводы

Проведенный анализ методов показал, что для декомпозиции временных рядов данных дистанционного зондирования Земли и последующего анализа причин изменений полученных трендов больше подходит метод STL. Этот метод имеет более гибкие настройки и позволяет выявлять краткосрочные циклы в межгодовой динамике ЧПП. Метод ССА не подходит для изучения трендов на коротких временных рядах, однако полезен для прогнозирования и выделения общих тенденций.

Пространственное распределение трендов выявило зоны уменьшения, роста и стабильного поведения ЧПП на исследуемой территории. Можно сделать вывод, что на большей части исследованной территории значения ЧПП остаются достаточно стабильными за рассмотренный период 2000–2012 гг. Снижение значений ЧПП на данной территории произошло на равнинах и на территории предгорий Западного Саяна. Эти площади представляют собой либо сельхозугодия, либо лесостепь на равнинных территориях до 300 м. Именно эти районы наиболее подвержены антропогенному воздействию, и именно они страдают в первую очередь при неблагоприятных погодных условиях, таких как засухи. Положительная динамика ЧПП за рассмотренный период времени наблюдается только на территории горных лесов Западного Саяна, занятой хвойными видами деревьев на высотах 600–1200 м. Эти территории не подвержены массивированному антропогенному воздействию.

Работа поддержана программой РАН, проект № 12 «Арктика».

Список литературы

1. Cao M., Prince S.D., Small J., Goetz S.J. Remotely sensed interannual variations and trends in terrestrial net primary productivity 1981–2000 // *Ecosystems*. – 2004. – Vol. 7. – P. 233–242.
2. Cleveland R.B., Cleveland W.S., McRae J.E., Terpenning I. STL: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess // *Journal of Official Statistics*. – 1990. – Vol. 6. – P. 3–73.
3. Golyandina N. and Osipov E. The Caterpillar-CCA method for analysis of time series with missing values // *J. of Statist. Plann. Inference*. – 2007. – Vol. 137. – P. 2642–2653.
4. Hüttich C., Herold M., Schmullius C., Egorov V., Bartalev S.A. SPOT-VGT NDVI and NDWI trends 1998–2005 as indicators of recent land cover change processes in northern Eurasia // *Proceedings of the 2nd Workshop of the EARSeL SIG on Land Use and Land Cover*. – 2006. – P. 336–344.
5. Soja A.J., Tchebakova N.M., French N.H.F., Flannigan M.D., Shugart H.H., Stocks B.J., Sukhinin A.I., Parfenova E.I., Chapin F.S., Stackhouse P.W. Climate-induced boreal forest change: Predictions versus current observations // *Global and Planetary Change*. – 2007. – Vol. 56, № 3–4. – P. 274–296.
6. Zhao M., Heinsch F.A., Nemani R.R., Running S.W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set // *Remote Sensing of Environment*. – 2005. – Vol. 95. – P. 164–176.

References

1. Cao M., Prince S.D., Small J., Goetz S.J. Remotely sensed interannual variations and trends in terrestrial net primary productivity 1981–2000 // *Ecosystems*. 2004. Vol. 7. pp. 233–242.
2. Cleveland R.B., Cleveland W.S., McRae J.E., Terpenning I. STL: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess // *Journal of Official Statistics*. 1990. Vol. 6. pp. 3–73.
3. Golyandina N. and Osipov E. The Caterpillar-SSA method for analysis of time series with missing values // *J. of Statist. Plann. Inference*. 2007. Vol. 137. pp. 2642–2653.
4. Hüttich C., Herold M., Schmullius C., Egorov V., Bartalev S.A. SPOT-VGT NDVI and NDWI trends 1998–2005 as indicators of recent land cover change processes in northern Eurasia // *Proceedings of the 2nd Workshop of the EARSeL SIG on Land Use and Land Cover*. 2006. pp. 336–344.
5. Soja A.J., Tchebakova N.M., French N.H.F., Flannigan M.D., Shugart H.H., Stocks B.J., Sukhinin A.I., Parfenova E.I., Chapin F.S., Stackhouse P.W. Climate-induced boreal forest change: Predictions versus current observations // *Global and Planetary Change*. 2007. Vol. 56, no. 3–4. pp. 274–296.
6. Zhao M., Heinsch F.A., Nemani R.R., Running S.W. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set // *Remote Sensing of Environment*. 2005. Vol. 95. pp. 164–176.

Рецензенты:

Сомова Л.А., д.б.н., Институт физики СО РАН, г. Красноярск;
 Барцев С.И., д.ф.-м.н., зав. лабораторией теоретической биофизики Института биофизики СО РАН, г. Красноярск.
 Работа поступила в редакцию 09.02.2015.