

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

МНОГОЛЕТНИЕ ТРЕНДЫ NDVI И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЮГЕ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ

© 2012 г. А. П. Шевырнов^{1,3*}, М. Ю. Чернецкий¹, Г. С. Высоцкая²

¹ Институт биофизики СО РАН, Красноярск

² Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск

³ Сибирский федеральный университет, Красноярск

*E-mail: ap_42@mail.ru

Поступила в редакцию 26.12.2011 г.

Найдено, что, начиная с 1999–2000 гг., нелинейный тренд NDVI горной тайги юга Красноярского края сменил направление с положительного на отрицательное. Сравнение с бореальным поясом Северной Евразии показало, что хотя смены направления тренда еще не произошло, наблюдается явное снижение скорости роста, т.е. выход на “плато”. Анализ трендов радиационной температуры поверхности показал, что для выделенного района горной тайги тренд температуры снижается, в то время как для Северной Евразии повышается. Для того чтобы исключить ошибку предварительной обработки данных, было проведено сравнение с данными температуры воздуха метеостанции “Ермаковское”. Регрессионный анализ показал достаточно высокую степень связи. Также была найдена довольно высокая степень связи между временными рядами и трендами температуры воздуха и NDVI. Тренды температуры воздуха Северной Евразии по данным NCEP-DOE Reanalysis 2 также подтверждают тренд, найденный на основе спутниковых данных.

Ключевые слова: NDVI, MODIS, AVHRR, GIMMS, температура воздуха, радиационная температура поверхности, тренды, Северная Евразия, Ермаковский район

ВВЕДЕНИЕ

Последнее десятилетие характеризуется многими крупномасштабными изменениями, в том числе изменением биоразнообразия лесных экосистем. В связи с этим особый интерес представляют таежные леса бореальной зоны. Они играют важную роль в глобальной газодинамике и в последнее время подвергаются интенсивной антропогенной нагрузке (вырубки, пожары и т.д.). В данной работе исследуются леса горно-таежного пояса Западного Саяна. Леса исследуемого района представляют собой часть лесов бореального лесного пояса Северной Евразии. В нашей предыдущей работе (Chernetskiy et al., 2011) был предложен метод угловых коэффициентов, с помощью которого можно определять скорость весенней вегетации. С помощью этого метода были найдены районы лесов юга Красноярского края с относительно стабильным весенним развитием в течение 10 лет. Весеннее развитие растительности является важным индикатором климатической изменчивости и состояния экосистем в целом. Можно предположить, что трендовая динамика, полученная на основе найденных районов, будет являться показателем развития стабильных лесных экосистем и их реакцией на изменчивость климата.

Существует достаточно большое количество исследований, посвященных изучению трендов бореальных лесов (Hüttich et al., 2006; Suzuki et al., 2001; Shabanov, 2002; Soja et al., 2007; Lopatin et al., 2006). Однако в большинстве работ используются достаточно короткие промежутки времени, т.е. или 1982–2000 гг. или годы, начиная с 2000 г. по настоящее время. Кроме того, даже на достаточно больших промежутках времени (1982–2008 гг.) обычно рассматриваются линейные тренды, которые не дают объективной картины реальных изменений (Bernier et al., 2011; Lopatin et al., 2006). Полученные результаты, при их верификации наземными данными, зачастую очень неоднозначны. Это говорит о недостатке знаний в области экологии лесов, о трудности верификации многолетних спутниковых данных, о неприменимости линейных моделей для определения зависимостей в сложных системах. Также неоднозначность результатов говорит о том, что точечные наземные измерения не дают возможности оценить картину в целом. Отсюда можно сделать вывод о недостатке знаний и необходимости исследований в области многолетней трендовой динамике лесов.

В данной работе оценивались нелинейные тренды в период 1982–2010 гг. Причем используемые методы позволяют учесть тренды, фенологию и шум. Исследования проводились на при-

Данные метеостанции “Ермаковское”

Средняя месячная и годовая температура воздуха на метеостанции “Ермаковское”												
Месяц												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
-18.4	-16.6	-7.4	2.8	10.4	16.4	18.5	16.0	9.6	2.0	-8.1	-16.2	0.8
Среднее месячное и годовое количество осадков на метеостанции “Ермаковское”												
Месяц												Год
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
22.0	17.8	18.9	36.3	61.2	68.4	86.9	77.0	62.0	41.3	35.2	28.0	555.0

мере участка, расположенного на территории Ермаковского района, находящегося в южной части Красноярского края. Большая часть территории района расположена в центре Западно-Саянских гор. Высота над уровнем моря в северной части района колеблется от 200 до 400 м. В южной части располагаются высокие горные хребты Западных Саян. Их средняя высота составляет 1000–1500 м. Территория Ермаковского района почти не затронута хозяйственной деятельностью.

На территории района представлены такие природные зоны, как степи и лесостепи равнинных территорий и природные зоны горных районов. Леса на территории района составляют 80% площади и приурочены к Саянам. На территории гор представлены следующие высотные пояса: степной, лесостепной, черневой, таежный, субальпийский, альпийский. К основным сообществам относятся черневые леса – кедровники, пихтарники; таежные леса – кедровники, пихтарники, редколесья; кустарниковая растительность; тундры – кустарниковые, моховые и лишайниковые, луга – субальпийские и альпийские (Чулочникова и др., 2005).

Климат района – резко континентальный, засушливый: с холодной малоснежной зимой и теплым летом. Амплитуды годового хода, характеризующие континентальность климата, достигают 37–40°C, в горных районах – 31–34°C, в местностях, расположенных в глубоких котловинах, – 43–45°C.

Даты устойчивого перехода среднесуточных температур на метеостанции “Ермаковское” через 0°C: при повышении среднесуточной температуры – 5 апреля, при понижении среднесуточной температуры – 26 октября (таблица).

На равнинах, в котловинных местностях годовое количество осадков меньше 400 мм, вблизи горных отрогов – от 450 до 650 мм, в горных районах – от 800 до 1300 мм. В годовом ходе максимум осадков выпадает в основном в июле. Осадки холодного периода очень незначительны в равнинных местностях, в защищенных горами кот-

ловинах. В горах же, напротив, в первую половину холодного периода осадки могут быть очень существенными, сравнимыми по величине с летними (таблица).

МЕТОДЫ И ДАННЫЕ

Самым ранним источником архивных данных о поверхности Земли являются данные NOAA/AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Временной ряд AVHRR начинается с 1982 г. Одним из наиболее корректных наборов данных AVHRR является GIMMS (Global Inventory Modeling and Mapping Studies). Данные GIMMS представляют собой временной ряд NDVI (Normalize Difference Vegetation Index) за 25-летний период. GIMMS был создан в рамках международного проекта по спутниковому изучению климатологии земной поверхности (International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP)). Этот набор данных является улучшенной версией данных AVHRR, с корректировками, учитывающими геометрию изображения, вулканические аэрозоли и другие эффекты не связанные с изменением растительности (Tucker et al., 2005, 2004; <http://gis-lab.info/qa/gimms.html>). Данные GIMMS доступны в виде 16-дневных композитных изображений с разрешением 8 км.

Архив данных GIMMS достаточно часто используется для исследования трендов NDVI (Fensholt et al., 2009; Julien, Sobrino, 2009; De Jong et al., 2011).

В настоящее время наиболее используемым источником данных для изучения поверхности Земли на глобальном и региональном уровне является спектрорадиометр MODIS, находящийся на борту спутников Terra и Aqua.

В данной работе используется продукт MODIS MCD43A4. Этот продукт представляет собой BRDF-корректированный коэффициент спектральной яркости, т.е. данные корректируются с использованием функции распределения двунаправленного отражения (Bidirectional Reflectance

Distribution Function – BRDF). Значения моделируются, таким образом, как если бы съемка проводилась в надир (Salomon et al., 2006; Román, 2009). BRDF-корректированные данные представляют собой 16-дневные композитные снимки с разрешением не выше 500 м. На основе MCD43A4 был рассчитан нормализованный вегетационный индекс (NDVI) за период 2000–2009 гг.

В качестве источника информации о температуре поверхности Земли был использован продукт MOD11A2. Данный продукт является набором 8-дневных композитных снимков MODIS/TERRA с разрешением 1000 м.

Региональная температура воздуха определяется по данным метеостанции “Ермаковское”.

Температура воздуха Северной Евразии была получена на основе метеорологических данных NCEP-DOE Reanalysis 2 (Kanamitsu et al., 2002; <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/reanalysis2/kana/reanl2-1.htm>).

Для выделения бореальных лесов Северной Евразии использовалась карта наземных экосистем северной Евразии – TerraNorte (Барталев и др., 2004).

Подробное описание метода угловых коэффициентов есть в работе (Chernetskiy et al., 2011). Метод основан на определении углового коэффициента регрессионной линии, найденной на основе кривой вегетационного индекса. Используется только участок кривой, соответствующий весеннему росту.

Для декомпозиции временных рядов была использована нелинейная процедура Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess (STL) – процедура сезонно трендовой декомпозиции, основанная на Лессе. STL является процедурой фильтрации для разложения сезонных временных рядов на три компоненты: сезонную, трендовую и остаточную (шум). Сущность метода состоит в ряде применений Loess-сглаживаний (Loess smoother) (Cleveland et al., 1990).

Другим современным нелинейным методом декомпозиции временных рядов является сингулярный спектральный анализ (ССА, “Гусеница”). Этот метод был разработан и обоснован в Санкт-Петербургском государственном университете. Метод основан на анализе главных компонент и позволяет исследовать стационарные и нестационарные временные ряды (Главные компоненты..., 1997; Голядина, 2004). “Гусеница” позволяет выделить интересующие 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 (Кашкин и др., 2009).

Метод STL, в зависимости от заданной степени сглаживания, способен выделять не только трендовые, но и тренд-циклические компоненты времен-

ных рядов. С другой стороны, метод “гусеницы” позволяет находить трендовые, циклические и др. компоненты временного ряда в виде отдельных спектральных составляющих. Поэтому для более детального сравнения трендов, полученных этими методами, в методе SSA необходимо определение трендовой и циклической компоненты ряда.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для выделения типов лесной растительности Северной Евразии была использована цифровая карта TerraNorte. На основе этой карты были выделены хвойные и смешанные леса с преобладанием хвойных. Однако TerraNorte создавалась на основе данных 2000 г. Для получения современного состояния, по среднему значению NDVI-MODIS за летний период 2009 г., были выбраны только точки со значением выше, чем 0.6. Таким образом, исключаются гари, вырубки т.п.

Выделена область Западного Саяна, находящаяся в пределах 89° – 95° с.ш. и 51° – 56° в.д., абсолютная высота 700–1200 м.

На основе выделенных областей были рассчитаны временные ряды NDVI и температуры. Эти ряды представляют собой средние по пространству значения измеряемой величины, которые рассчитаны по каждому снимку. Полученные таким образом ряды имеют слабовыраженный тренд. Часто для выделения тренда используется линейный или нелинейный метод наименьших квадратов. Однако выделение тренда такого вида методом наименьших квадратов может привести к завышению или занижению значений реального тренда (Кашкин и др., 2009). Чтобы понять реальный тренд временного ряда, маскируемый фенологией и шумами, необходимо использовать непараметрические методы разложения временных рядов.

Несмотря на то, что оба выбранных метода STL и SSA являются нелинейными и непараметрическими, основаны они на разных принципах. Поэтому получаемые по этим методам результаты взаимно дополняют и косвенно подтверждают друг друга. Тренды с помощью методов STL и SSA рассчитывались для всех временных рядов NDVI и температуры.

Проблема искажения на концах трендов была решена так, как это описано в работе (Кашкин и др., 2009). Смысл в том, чтобы сместить искажаемый участок за пределы ряда.

С целью продления временного ряда данные GIMMS-AVHRR с 2006 г. были продолжены данными MODIS до 2009 г.

Методы STL и SSA показывают наличие перегиба трендовой кривой в 1996–2000 гг. как для горной тайги, так и для бореальных лесов (рис. 1). Тренды, полученные по продленному временно-

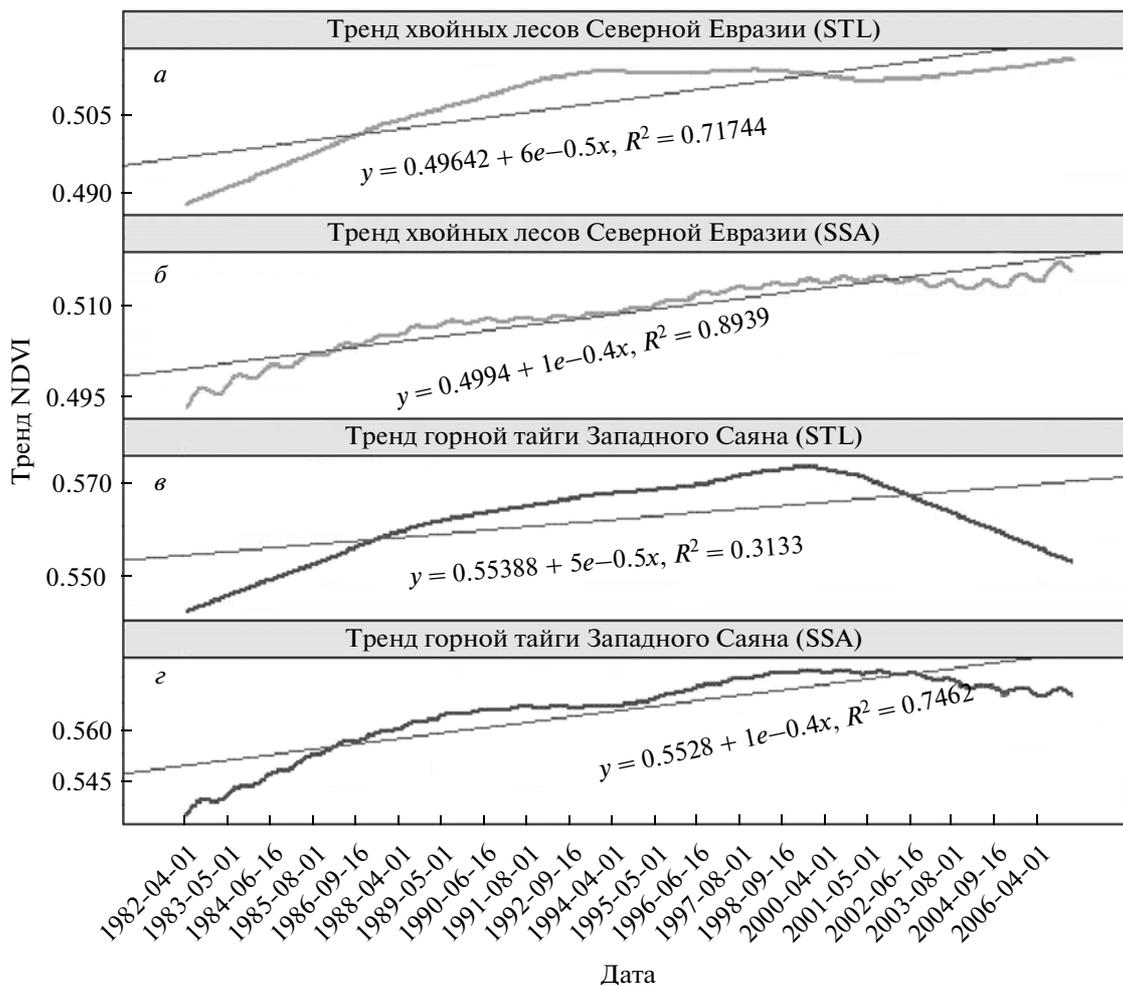


Рис. 1. Тренды AVHRR-GIMMS 1982–2006 гг., полученные методами STL и SSA: а – STL; б – SSA, хвойные и смешанные леса Северной Евразии; в – STL; г – SSA, горная тайга западного Саяна.

му ряду 2000–2009 гг., продолжают эту тенденцию (рис. 2). Тренд горной тайги имеет перегиб в 2000 г. по данным GIMMS (рис. 1в, г). По данным MODIS, этот отрицательный тренд продолжается и имеет линейный вид для периода 2000–2009 гг. (рис. 2в, г)

Для Северной Евразии положительный тренд “замедляется” \approx с 1994 г. По данным MODIS, значения NDVI продолжают повышаться, но гораздо медленней, чем в период 1982–1994 гг.

В 2000 г. имеется перегиб кривой. Линейный тренд этот перегиб не улавливает.

Как известно, в бореальной зоне основным фактором, влияющим на развитие растительности, является температура. Для рассматриваемых районов, по данным MODIS, были рассчитаны тренды на основе временных рядов температуры поверхности (рис. 3). Временной ряд, полученный на основе данных MOD11C2, имеет среднее значение стандартной ошибки $SE = 0.0079$ в диа-

пазоне от 0.0035 до 0.016. MOD11A2, $SE = 0.04$ в диапазоне 0.016–0.079.

В данном случае стоит отметить, что температура поверхности здесь – это преимущественно температура поверхности верхнего яруса лесной растительности. Видно, что температура горных лесов западного Саяна имеет тенденцию к снижению (рис. 3а, б). Тренд SSA показывает снижение на 0.8° с угловым коэффициентом -0.002 . С другой стороны, температура бореальных лесов Северной Евразии за последние 10 лет имеет тенденцию к повышению. Тренд STL показывает повышение на 0.4° с угловым коэффициентом 0.0007, SSA – на 0.3° с угловым коэффициентом 0.0003. Здесь надо отметить некоторое различие трендов STL и SSA. Особенно это заметно на рис. 4а, б. Это может быть связано с сущностью методов. SSA является процедурой разложения на спектральные составляющие, а STL в свою очередь – в большей степени сглаживающая процедура.

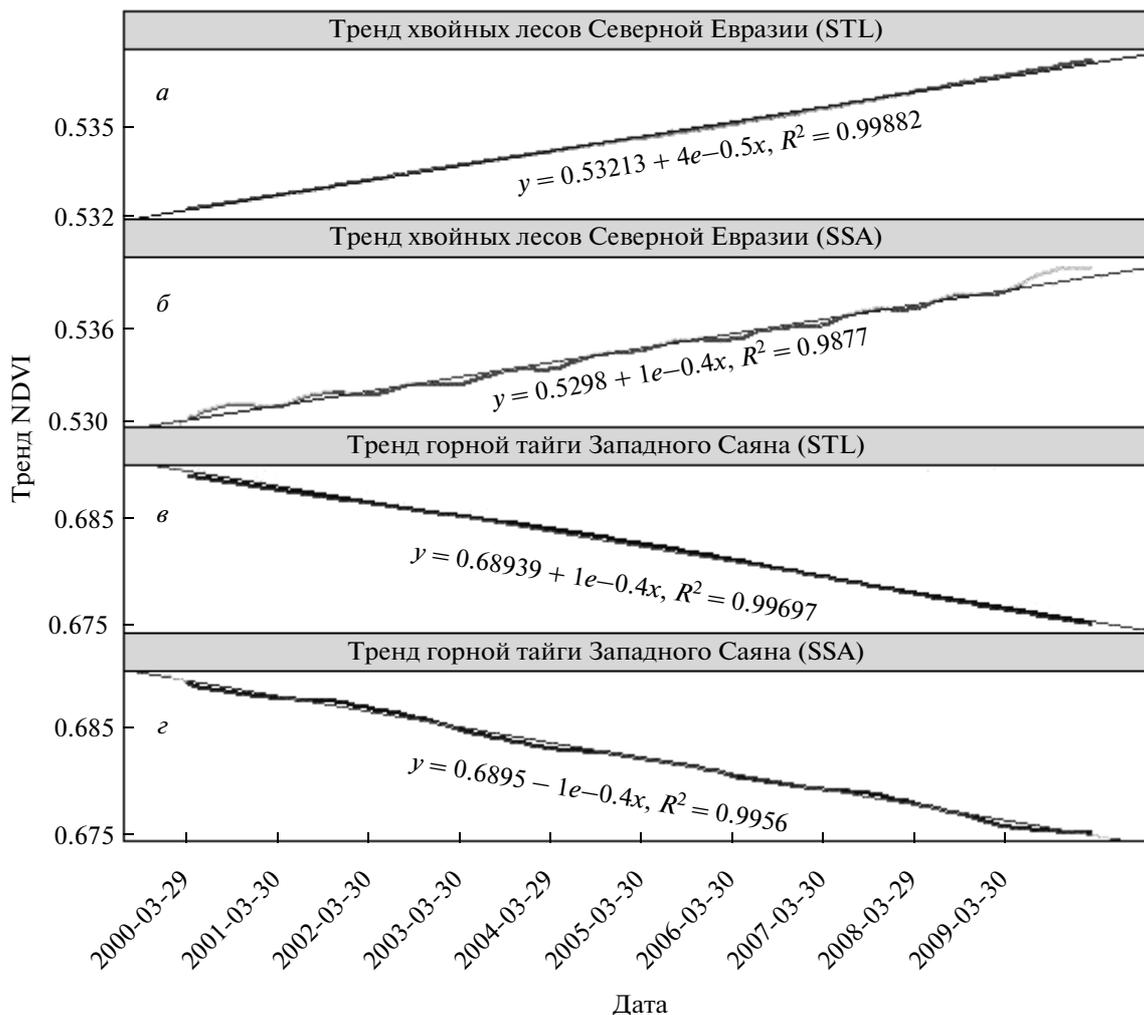


Рис. 2. Тренды NDVI MODIS 2000–2009 гг., полученные методами STL и SSA: *а* – STL; *б* – SSA, хвойные и смешанные леса Северной Евразии; *в* – STL; *г* – SSA, горная тайга западного Саяна.

Для верификации трендов температуры поверхности в качестве наземных данных были рассчитаны тренды температуры воздуха на основе информации метеостанции “Ермаковское”. Данная метеостанция является ближайшей к исследуемому району и имеет доступный ряд данных в период 2000–2010 гг. Данные были взяты из архива погодных условий сервера “погода России” (<http://meteo.infospace.ru>). Метеостанция находится ближе всего к рассматриваемому району (53°18′ с.ш., 92°25′ в.д., высота – 298 м.)

Тренд, полученный на основе данных метеостанции, показывает линейное снижение температуры воздуха за последние 10 лет, что в общем согласуется с трендами рис. 2.

Тренды температуры воздуха, соответствующие бореальным лесам Северной Евразии, были рассчитаны по данным NCEP-DOE. Полученные тренды показывают линейное повышение температуры на 1°С.

Коэффициент корреляции между временными рядами метеостанции и MODIS $r = 0.96$, между трендами $r = 0.79$. Таким образом, сравнение с температурой воздуха является подтверждением трендов рис. 3.

Для того чтобы исключить возможность ошибки аппаратуры, было проведено сравнение спектро радиометров MODIS, находящихся на борту спутников Terra и Aqua. Terra поставляет данные с 2000 г., Aqua с 2002 г. Каждый из этих спутников делает полное покрытие Земли 1 раз в сут, но в разное время. Для сопоставления использовался выделенный регион горной тайги. Было найдено, что коэффициент корреляции между временными рядами $r = 0.996$, между трендами $r = 0.993$. Высокие значения коэффициентов корреляции исключают возможность аппаратурной ошибки.

Можно сделать очевидное предположение, что сезонная и многолетняя динамика температуры связаны с динамикой вегетационных индексов. Из

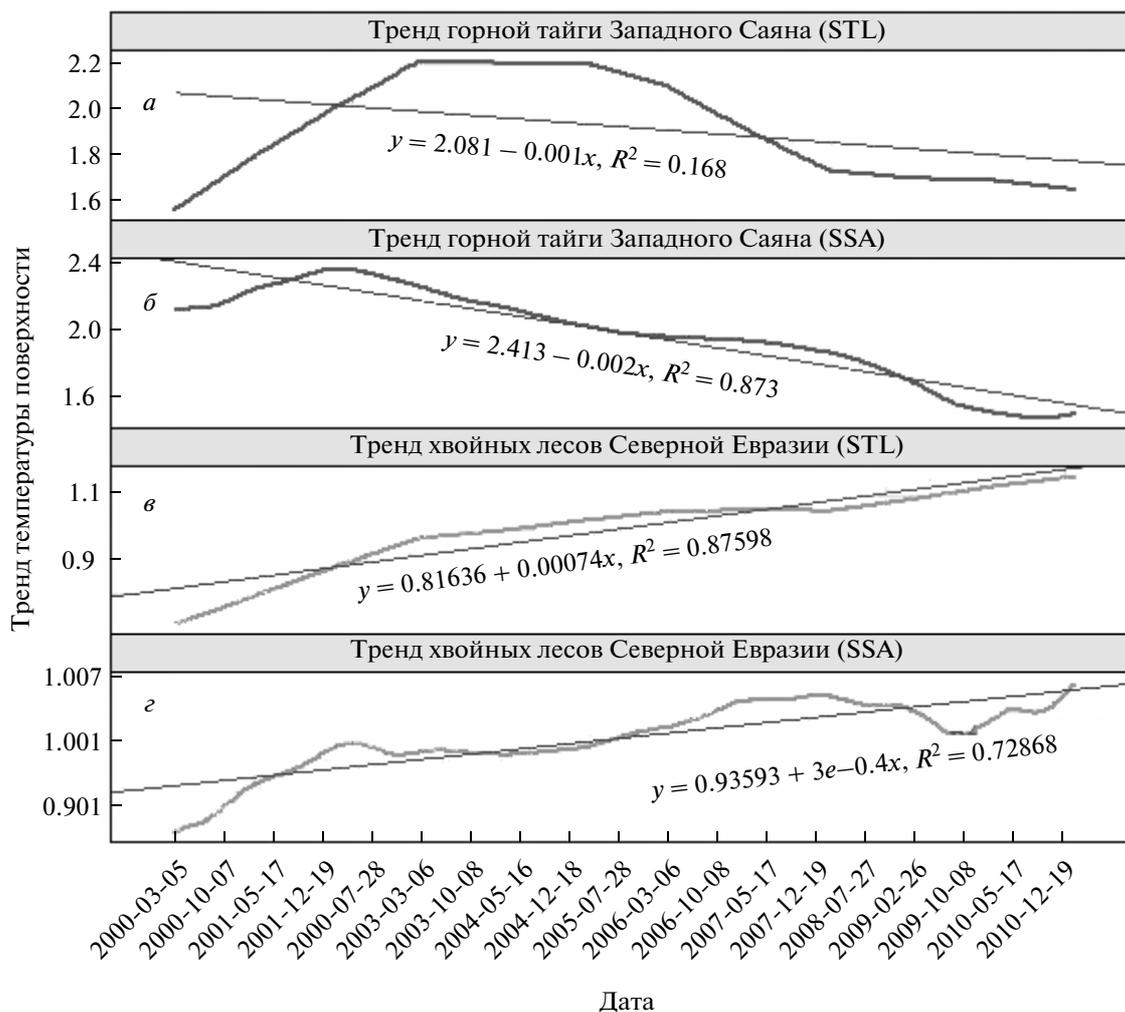


Рис. 3. Тренды температуры поверхности, полученные на основе данных Terra\MODIS: *а, б* – горная тайга западного Саяна (STL, SSA); *в, г* – хвойные и смешанные леса Северной Евразии (STL, SSA).

этого можно предположить, что тренды, найденные на основе температуры воздуха и радиационной температуры поверхности, могут являться косвенным подтверждением достоверности тренда NDVI. Кроме того, косвенным подтверждением достоверности может являться сопоставимость трендов, полученных разными методами.

С целью сравнения были построены диаграммы разброса для тренд-циклических компонент, полученных разными методами (рис. 4). Причем тренды SSA были получены с помощью группировки нескольких компонент, т.е. были выбраны медленно изменяющиеся компоненты, соответствующие трендам и многолетним циклам. Причем собственно трендовые компоненты имели собственные значения, равные 98 и 65% для NDVI и температуры соответственно, т.е. согласно методу SSA, большая часть дисперсии данных объясняется трендом. Компоненты, соответствующие многолетним циклам, имели собственные значе-

ния 0.011% и 0.009% для NDVI и 0.1% – для температуры.

Оба метода показали общую тенденцию на снижение как для температуры, так и для NDVI. Также можно отметить наличие трех циклов, связанных с температурой. Эти циклы плохо просматриваются в тренде, найденном “гусеницей” (рис. 4б, г). Также оба метода показывают наличие спада значений NDVI в конце 2007 г. – начале 2008 г., не связанного с температурой. Собственные значения компонент, связанных с трендами, по методу SSA, 98 и 64% соответственно для NDVI и температуры. Это говорит о том, что трендовой изменчивостью объясняется значительная часть дисперсии данных.

Схожесть тренд-циклических компонент особенно хорошо заметна на методе STL при данном параметре сглаживания тренда (рис. 4а, в). Особенно следует обратить внимание на совпадение сравнительно незначительных участков кривых

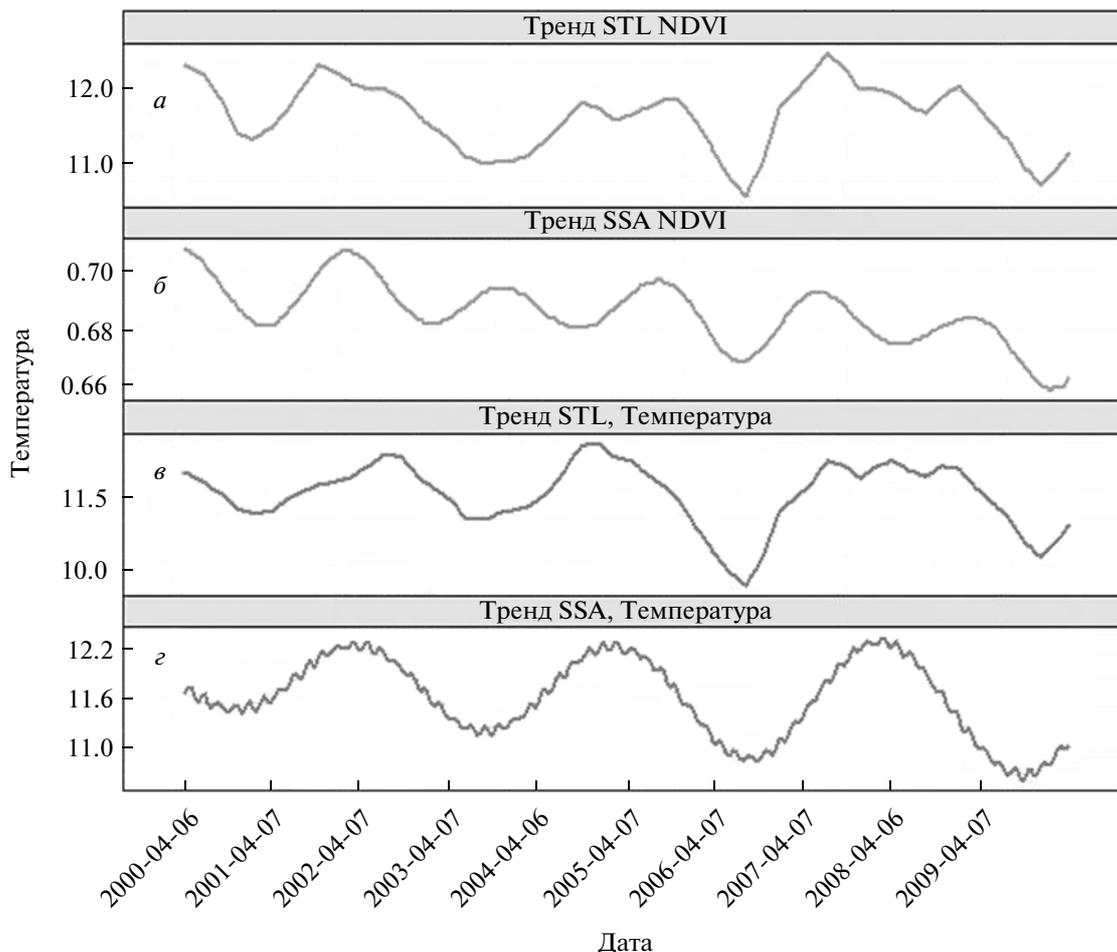


Рис. 4. Тренды, MODIS NDVI и температуры поверхности 2000–2009 гг. для горной тайги: *a, б* – тренды MODIS NDVI, полученные с помощью STL и SSA соответственно; *в, з* – тренды температуры (Terra\MODIS), полученные с помощью STL и SSA.

температуры и NDVI. В свою очередь тренд температуры, при том же значении параметра сглаживания, подтверждается трендом температуры воздуха по данным метеостанции, т.е. можно говорить о подтверждении тренда NDVI.

Неслучайное распределение точек на диаграмме разброса (рис. 5*a*) показывает, что метод STL дает более гладкие кривые, чем SSA (рис. 5*б*). Это объясняется тем, что основой STL являются сглаживающие процедуры Loess-фильтров. Таким образом, диаграмма разброса трендовых кривых, полученных по методу STL, может являться дополнительным средством анализа взаимозависимости трендов. Такая диаграмма по сути является фазовой кривой, показывающей поведение динамической системы.

ОБСУЖДЕНИЕ

Часто для исследования многолетней динамики биофизических параметров используется ме-

тод аномалий, однако при применении данного метода к временным рядам спутниковых данных велика вероятность искажений вследствие не учета шумовой компоненты. Другой часто применяемый подход – это линейная регрессия. Такая модель применима только к временному ряду, у которого отсутствует корреляционная связь между элементами ряда. Однако элементы многолетнего временного ряда температуры или NDVI имеют сильную корреляционную связь вследствие наличия периодичности.

Детальное сравнение регионального и субконтинентального уровня в общем показало совпадение динамики температуры поверхности, температуры воздуха и NDVI.

Сравнение методов STL и SSA показало, что с помощью обоих методов можно выделять слабо выраженные тренды. В разных ситуациях может иметь преимущество тот или другой метод. Так, на основании сравнения с температурой поверхности можно заключить, что на рис. 4 STL пока-

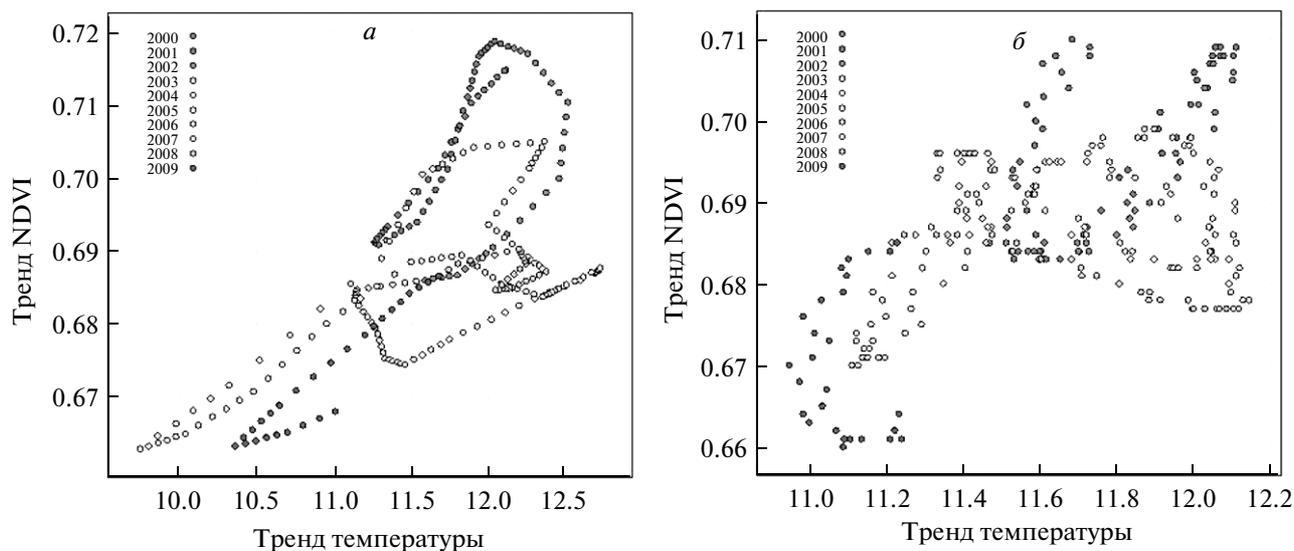


Рис. 5. Диаграммы рассеяния трендов MODIS NDVI и температуры поверхности 2000–2009 гг.: а – тренды, полученные на основе STL-метода; б – тренды SSA.

зал более точный результат. Тренды температуры поверхности и NDVI, полученные по методу STL, имеют очень схожий вид (рис. 4, 5). С другой стороны, в некоторых случаях STL имеет тенденцию к некоторому искажению концов тренда, как можно видеть на рис. 3. Однако проверить точность в этом смысле не просто.

К достоинствам данного метода следует отнести получение гладких кривых линий трендов. Недостатком STL является то, что необходимо точно знать период ряда.

Метод гусеницы весьма эффективен в случаях неявных трендов или для выявления других неочевидных эффектов, т.е. когда требуется тщательный анализ сложных временных рядов с неизвестными свойствами.

Полученные результаты, показывающие рост температурного тренда и замедление тренда NDVI, в общем согласуются с литературными данными. Так, у (Angert et al., 2005) показано, что увеличение “зелености” в северных высоких широтах было преобладающим с 1982 по 1991 гг. С 1994 по 2002 гг. “позеленение” продолжилось для большей части тундры и сменилось на отрицательный тренд для многих лесных районов. Рисунки 1, 2 показывают подтверждение этому. Особенно это заметно на примере исследуемого региона. Многими авторами утверждается, что в Северном полушарии, несмотря на продление вегетационного периода, многие области имеют отрицательные тренды NDVI и NPP (Net Primary Production). Обычно это объясняется увеличением количества засух и недостатком увлажнения в целом (Ciais et al., 2005; Lapenis et al., 2005; Zhao, Running, 2010; Berner et al., 2011). В работе (Zhao, Running,

2010) было показано, что линейный тренд NPP имеет отрицательное направление в Южном полушарии и положительное в Северном. Также в этой работе делается предположение, что положительный тренд Северного полушария объясняется потеплением, и это временное явление. Впоследствии, как предполагают авторы, из-за негативных явлений, вызванных потеплением (недостаток увлажнения, засухи, пожары и т.п.), тренд NPP также должен смениться на отрицательный. Важной частью модели MODIS-NPP является уровень фотосинтеза, который рассчитывается на основе тех же спектральных данных, что и NPP. Поэтому NDVI и NPP в пределах одного биома связаны. И, действительно, рис. 1, 2 показывают явное замедление роста значений NDVI в последнее десятилетие при том, что тренд температуры продолжает почти линейно расти (рис. 3а, б). Очевидно, что линейный тренд не способен уловить такой тип изменчивости NDVI и покажет просто положительную тенденцию.

Следует отметить, что для исследуемого участка юга Красноярского края тренд NDVI меняется с положительного направления на отрицательное, тренд температуры также отрицателен (рис. 3а, б). Известно также, что данный регион не испытывает недостатка в увлажнении и осадках. Таким образом, можно предположить, что данное поведение трендовой кривой NDVI связано с климатическими изменениями на региональном уровне и не связано с крупномасштабным изменением климата.

В то же время ряд исследований показал, что тренды основных климатических параметров различны для различных сезонов, местностей и периодов времени (Высоцкая, 2002; Nanni, 1999;

Thompson, 1999; Зукерт, Замолодчиков, 1997). В исследовании (Высоцкая, 2002) показано, что для всей территории Сибири в течение 1936–1990 гг. наблюдается уменьшение значений континентальности. Континентальность климата отмечается значительными колебаниями температуры воздуха, уменьшением влажности, облачности и осадков и большой изменчивостью этих показателей. Количественная характеристика континентальности климата — амплитуда годового хода температуры воздуха: чем больше амплитуда годового хода, тем больше континентальность. Амплитуда годового хода — это разность между среднемесячными температурами самого теплого и самого холодного месяца. Так же данное исследование показало, что для юга Красноярского края характерен тренд снижения температуры воздуха в летние месяцы и повышения в зимние.

При сравнении динамики среднемесячных температур для Северного полушария и метеостанции “Ермаковское” выяснилось, что повышение среднемесячных температур для Северного полушария сопровождается статистически значимым повышением среднемесячных температур для метеостанции “Ермаковское” для месяцев с октября по май, а также для августа, т.е. потепление Северного полушария не ведет к изменению температур для основной части сезона вегетации. При этом повышение температур в мае и августе вряд ли приведет к угнетению фотосинтеза, поскольку в данный момент обычная температура в эти месяцы ниже физиологически оптимальной. С другой стороны, при сравнении динамики среднемесячных температур для Северного полушария и осадков на метеостанции “Ермаковское” выяснилось, что повышение средней температуры мая для Северного полушария сопровождалось статистически значимым уменьшением осадков на метеостанции “Ермаковское”, а повышение средней температуры июня для Северного полушария сопровождалось статистически значимым увеличением осадков на метеостанции “Ермаковское”. В остальные месяцы общее потепление в Северном полушарии не оказывало статистически значимого влияния на осадки в Ермаковском районе.

ВЫВОДЫ

Найдено, что, начиная с 1999–2000 гг., тренд NDVI исследуемого района горной тайги сменил направление с положительного на отрицательное. Сравнение с бореальным поясом Северной Евразии показало, что хотя смены направления тренда еще не произошло, наблюдается явное снижение скорости роста, т.е. выход на “плато”.

Анализ трендов радиационной температуры поверхности показал, что действительно для выделенного района горной тайги тренд температу-

ры снижается, в то время как для Северной Евразии повышается.

Для того чтобы исключить ошибку аппаратуры, было проведено сравнение данных спектро-радиометров Terra и Aqua. Регрессионный анализ по пересекающимся 2002–2010 гг. показал высокую степень связи $r = 0.996$ и $r = 0.993$ для временных рядов и трендов соответственно.

Для того чтобы исключить ошибку предварительной обработки данных, было проведено сравнение с данными температуры воздуха метеостанции “Ермаковское”. В указанном случае регрессионный анализ также показал достаточно высокую степень связи, $r = 0.96$ и $r = 0.79$ для временных рядов и трендов соответственно. Также была найдена довольно высокая степень связи между временными рядами и трендами температуры воздуха и NDVI. Тренды температуры воздуха Северной Евразии по данным NCEP-DOE Reanalysis 2 также подтверждают тренд, найденный на основе спутниковых данных.

Также обнаружено, что найденные тенденции развития NDVI в общем соответствуют некоторым литературным источникам. В ряде работ делается предположение, что если температура будет продолжать повышаться, продуктивность растительности Северного полушария сменит свой знак с положительного на отрицательный. Однако, как правило, исследуются линейные тренды, которые все еще показывают положительный общий тренд. Отрицательные линейные тенденции были найдены только в некоторых областях. Кроме того, повышение средней температуры Северного полушария может сопровождаться сокращением влияния Сибирского антициклона на некоторых территориях Сибири, что в свою очередь способствует увеличению снежного покрова и смягчению возможных летних засух.

Таким образом, в работе была показана важность определения нелинейных трендов развития растительности. Это было доказано посредством определения нелинейных трендов NDVI в течение 1982–2009 гг.

Работа выполнена при поддержке Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности 04/11 от 19.09.2011, программой СО РАН “Биоразнообразие” раздел 34, программой СО РАН 6.9, 01.01.2009–31.12.2011, №50.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Барталев С.А., Белвард А.С., Еришов Д.В., Исаев А.С. Карта наземных экосистем Северной Евразии по данным SPOT-Vegetation. Проект Global Land Cover 2000. Информационная система TerraNorte. 2004. ИКИ РАН. (<http://terranorte.iki.rssi.ru>).

Высоцкая Г.С., Дмитриев А.И., Ноженкова Л.Ф., Шишов В.В. Пространственное распределение трендов

- климатических параметров (XX век) // Основные закономерности глобальных и региональных изменений климата и природной среды в позднем кайнозое Сибири. 2002. С. 83–96.
- Голяндина Н.Э. Метод “Гусеница” SSA: анализ временных рядов. СПб.: СПб. ун-т, 2004. 74 с.
- Данилов Д.Л., Жигляевский А.А. Главные компоненты временных рядов: метод “Гусеница” СПб.: Пресском, 1997. 308 с.
- Зукерт Н.В., Замолодчиков Д.Г. Изменения температуры воздуха и осадков в тундровой зоне России // Метеорология и гидрология. 1997. № 8. С. 45–52.
- Кашкин В.Б., Романов А.А., Рублева Т.В. Исследование трендов спутниковых оценок общего содержания озона с использованием сингулярного спектрального анализа // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 4. С. 9–16.
- Чулочникова О.В., Бойко С.М., Степанов В.С., Кайнова А., Цицвера Н., Головки Т. Природа Ермаковского района. Абакан: Фирма Март, 2005. 61 с.
- Angert A., Biraud S., Bonfils C., Henning C.C., Buermann W., Pinzon J., Tucker C.J., Fung I. Drier summers cancel out the CO₂ uptake enhancement induced by warmer springs // Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A. 2005. V. 102. P. 10823–10827.
- Berner, L.T., Beck P.S.A., Bunn A.G., Lloyd A.H., Goetz S.J. High-latitude tree growth and satellite vegetation indices: Correlations and trends in Russia and Canada (1982–2008) // J. Geophys. Res. 2011. V. 116.
- Chernetskiy M., Pasko I., Slyusar N., Shevyrnogov A., Khodyayev A. A study of forest vegetation dynamics in the south of the Krasnoyarskii Krai in spring // Advan. Sp. Res. 2011. V. 48. P. 819–825.
- Ciais Ph., Reichstein M., Viovy N., Granier A., Ogée J., Allard V., Aubinet M., Buchmann N., Bernhofer Chr., Carrara A., Chevallier F., De Noblet N., Friend A.D., Friedlingstein P., Grünwald T., Heinesch B., Keronen P., Knohl A., Krinner G., Loustau D., Manca G., Matteucci G., Miglietta F., Ourcival J.M., Papale D., Pilegaard K., Rambal S., Seufert G., Soussana J.F., Sanz M.J., Schulze E. D., Vesala T., Valentini R. European reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003 // Nature. 2005. V. 437. P. 529–533.
- Cleveland R.B., Cleveland W.S., McRae J.E., Terpenning I. STL: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess // J. Offic. Stat. 1990. 6, 3–73.
- Cleveland W.S., Devlin S.J. Locally-Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting // J. Amer. Stat. Assoc. 1988. V. 83. № 403. P. 596–610. doi:10.2307/2289282. JSTOR 2289282.
- De Jong R., De Bruin S., De Wit A., Schaepman M.E., Dent D.L. Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series // Rem. Sens. Env. 2011. V. 115. № 2. P. 692–702.
- Fensholt R., Rasmussen K., Nielsen T.T., Mbow C. Evaluation of earth observation based long term vegetation trends – Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data // Rem. Sens. Env. 2009. V. 113. № 9. P. 1886–1898.
- 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 // Proc. 2nd Workshop of the EARSel SIG on Land Use and Land Cover. 2006. P. 336–344.
- Julien Y., Sobrino J.A. Global land surface phenology trends from GIMMS database // Int. J. Rem. Sens. 2009. V. 30. № 13. P. 3495–3513.
- Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Yang S.-K., Hnilo J.J., Fiorino M., Potter G.L. NCEP-DEO AMIP-II Reanalysis (R-2) // Bul. Atm. Met. Soc. 2002. P. 1631–1643.
- Lapenis A., Shvidenko A., Shepaschenko D., Nilsson S., Aiyyer A. Acclimation of Russian forests to recent changes in climate // Global Change Biol. 2005. V. 11. № 12. P. 2090–2102.
- Lopatin E., Kolström T., Spiecker H. Determination of forest growth trends in Komi Republic (northwestern Russia): combination of tree-ring analysis and remote sensing data // Boreal Env. Res. 2006. V. 11. P. 341–353.
- Nanni T., Lo Vecchio G., Cecchini S. Variability of Surface Air Temperature in Italy 1870±1980 // Theor. Appl. Climatol. 1998. V. 59. P. 231–235.
- Román M.O., Schaaf C.B., Woodcock C.E., Strahler A.H., Yang X., Braswell R.H., Curtis P., Davis K.J., Dragoni D., Goulden M.L., Gu L., Hollinger D.Y., Kolb T.E., Meyer T.P., Munger J.W., Privette J.L., Richardson A.D., Wilson T.B., Wofsy S.C. The MODIS (Collection V005) BRDF/albedo product: Assessment of spatial representativeness over forested landscapes // Rem. Sens. Env. 2009. V. 113. P. 2476–2498.
- Salomon J., Schaaf C.B., Strahler A.H., Gao F., Jin Y. Validation of the MODIS Bidirectional Reflectance Distribution Function and Albedo Retrievals Using Combined Observations from the Aqua and Terra Platforms // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2006. V. 44. № 6.
- Schowengerdt R.A. Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing – Second Edition. San Diego—Chestnut Hill: Academic Press, 1997.
- Shabanov N.V., Liming Z., Knyazikhin Y., Ranga B., Myneni, Tucker C.J. Analysis of interannual changes in northern vegetation activity observed in AVHRR data from 1981 to 1994 // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2002. V. 40. № 1. P. 115–130.
- Soja A.J., Tchepakova N.M., French Nancy H.F., Flannigan M.D., Shugart H.H., Stocks B.J., Sukhinin A.I., Parfenova E.I., Chapin III F.S., Stackhouse P.W. Jr. Climate-induced boreal forest change: Predictions versus current observations // Global Planetary Change. 2007. V. 56. № 3–4. P. 274–296.
- Suzuki R., Nomaki T., Yasunari T. Spatial distribution and its seasonality of satellite-derived vegetation index (NDVI) and climate in Siberia. International journal of climatology // Int. J. Climatol. 2001. V. 21. P. 1321–1335.
- Thompson R.A. Time-series analysis of the changing seasonality of precipitation in the British Isles and neighboring areas // J. Hydrol. 1999. V. 224. P. 169–183.
- Tucker C.J., Pinzon J.E., Brown M.E., Slayback D., Pak E.W., Mahoney R., Vermote E., El Saleous N. An Extended AVHRR 8-km NDVI Data Set Compatible with MODIS and SPOT Vegetation NDVI Data // Int. J. Rem. Sens. 2005. V. 26. № 20. P. 4485–5598.
- Tucker C.J., Pinzon J.E., Brown M.E. Global Inventory Modeling and Mapping Studies, NA94apr15b.n11-Vig, 2.0 // Global Land Cover Facility, Univ. Maryland, College Park, Maryland. 04/15/1994. 2004.
- Zhao M., Running S.W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009 // Science. 2010. V. 329. P. 940–943.

Interannual Trend of NDVI and Temperature in the South of Krasnoyarsky Kray

A. P. Shevyrnogov^{1,3}, M. Yu. Chernetskiy¹, G. S. Vysotskaya²

¹ *Institute of Biophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk*

² *Institute of Computational Modelling, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk*

³ *Siberian Federal University, Krasnoyarsk*

It was found that, from 1999–2000, a nonlinear trend of NDVI, southern mountain taiga of Krasnoyarskiy Kray, changed direction from positive to negative. Comparison with the boreal zone of North Eurasia revealed that although a change of trend has not happened yet, there is a clear decrease in growth rate, i.e. access to the “plateau”. Trend analysis of the land surface temperature showed that the trend of selected area of the mountain taiga is decreasing, while for Northern Eurasia increases. In order to eliminate the error of pre-processing data were compared with data of air temperature weather station “Yermakovskoye”. Regression analysis showed a fairly high degree of correlation. Also, was found high degree of correlation between time series and trends of air temperature and NDVI. Trends in air temperature in Northern Eurasia according to NCEP-DOE Reanalysis 2 also confirms the trend found on the basis of satellite data.

Keywords: MODIS, AVHRR, GIMMS, NDVI, air temperature, land surface temperature, trends, North Eurasia, Eramakovskiy region